



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

경 영 학 석 사 학 위 논 문

이중선체 유조선의 도입에 따른
경제적 타당성 분석
-미국사례를 중심으로-



부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 산 업 경 영 학 과

한 아 영

경 영 학 석 사 학 위 논 문

이중선체 유조선의 도입에 따른
경제적 타당성 분석
-미국사례를 중심으로-

지도교수 표 희 동

이 논문을 경영학석사 학위논문으로 제출함.



2014년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 산 업 경 영 학 과

한 아 영

한아영의 경영학석사 학위논문을 인준함.

2014년 8월 22일



주 심 경영학박사 김도훈 (인)

위 원 경제학박사 장병기 (인)

위 원 경제학박사 표희동 (인)

목 차

I. 서론	1
1. 연구배경 및 목적	1
2. 연구방법 및 내용	3
II. 선행연구	4
1. 비용-편익 분석의 이론적 연구	4
2. 실증연구	8
3. 선행연구 검토결과	12
III. 해양유류유출 현황	13
1. 세계 해양유류유출에 대한 현황분석	13
2. 미국 해양유류유출에 대한 현황분석	19
3. 우리나라 해양유류유출에 대한 현황분석	23
4. 해양유류유출에 대한 현황 분석결과	26
IV. 이중선체 도입 및 현황	29
1. 이중선체의 정의 및 특징	29
2. 이중선체의 도입 및 현황	31
V. 실증분석	38
1. Chow 단절점 검증	38
2. 비용-편익분석	44
VI. 결론	59
【참고문헌】	61

표 목 차

<표 3-1> 주요 해양 유류유출 사고(1967년 이후)	18
<표 3-2> 세계 및 미국, 한국 해양유류유출 현황분석	28
<표 4-1> 유조선 및 바지선에 대한 유류오염법 핵심 조항의 효과	32
<표 4-2> 유류오염법(OPA 90)의 단일선체 유조선 퇴출일정	34
<표 4-3> 국제해사기구(IMO)의 단일선체 유조선 퇴출일정	36
<표 4-4> 국제해사기구(IMO)의 단일선체 유조선 카테고리 구분	36
<표 4-5> 유럽연합의 단일선체 유조선 퇴출 규정	37
<표 5-1> OPA 90 발효 이전기간에 대한 시계열 자료 기초통계량	41
<표 5-2> OPA 90 발효 이후기간에 대한 시계열 자료 기초통계량	41
<표 5-3> 시계열 자료에 대한 단위근 분석결과	41
<표 5-4> Chow 단절점 검증결과	43
<표 5-5> 이중선체 유조선 도입에 따른 편익과 비용	46
<표 5-6> 미국에서 발생한 유조선 사고발생비율	47
<표 5-7> 미국에서 발생한 대형 유류유출사고 사례	48
<표 5-8> 크기에 따른 이중선체 유조선 분류	49
<표 5-9> 미국에서 퇴출된 단일선체 유조선 척수 및 적재중량톤(DWT)	50
<표 5-10> 총비용 공식의 비교	52
<표 5-11> 유류유출에 따른 지역별 톤당 평균정화비용	53
<표 5-12> 이중선체 유조선의 증가된 건조비용	53
<표 5-13> 이중선체 유조선의 증가된 운영비용	54
<표 5-14> 시나리오별 비용-편익분석 기준	55
<표 5-15> 시나리오별 비용-편익분석 결과>	56
<표 5-16> 경제적 타당성 분석 결과 비교>	58

그림 목 차

<그림 3-1> 10년 단위 대형 유류유출(700톤 이상) 발생 건수와 비율	13
<그림 3-2> 중간규모(7-700톤)와 대규모(700톤 이상) 유류유출 발생건수	14
<그림 3-3> 10년 단위 총 유류유출량의 비율(1970-2009)	15
<그림 3-4> 7톤 이상 유류유출량 및 대형 유류유출사고(1980년-2013년)	15
<그림 3-5> 7톤 미만의 세계유류유출 사고원인(1974-2013)	16
<그림 3-6> 7톤 이상 700톤 미만의 세계유류유출 사고원인(1974-2013)	17
<그림 3-7> 700톤 이상의 세계유류유출 사고원인(1974-2013)	17
<그림 3-8> 유출 크기에 따른 사고 건수(1973-2009)	19
<그림 3-9> 유출크기에 따른 유출량(1973-2009)	20
<그림 3-10> 사고 원인에 따른 건수(1973-2009)	21
<그림 3-11> 사고 원인에 따른 유출량(1973-2009)	21
<그림 3-12> 우리나라 해양오염사고 기름 유출량 및 사고건수	23
<그림 3-13> 최근 10년간 사고원인별 평균 유출량 및 사고건수	24
<그림 3-14> 최근 10년간 오염원별 평균 유출량 및 사고건수	25
<그림 4-1> 좌초 후 이중선체와 단일선체 유조선의 비교	29
<그림 4-2> 미국항구의 전체 및 이중선체 기항횟수	35
<그림 5-1> 미국에서 발생한 유조선 유류유출량과 사고건수	40

An Economic Analysis of Double Hulled Tankers in USA

Ah Yeong, Han

*Department of Marine Business and Economics,
The Graduate School, Pukyong National University*

Abstract

While much work has been done in analysing the effect of U.S. Oil Pollution Act of 1990, little research has been conducted on the cost-benefit analysis(CBA) of double hulled tanker's requirements in reducing marine pollution.

The main purpose of this study is to estimate the economic value of double-hulled tanker's requirements. In this paper, a chow breakpoint test and a cost-benefit analysis(CBA) are conducted on the double-hull tankers requirements in the U.S. Oil Pollution Act of 1990.

As a step towards the incorporation of economic analysis, this study considers the cost and benefit components. Benefit elements include prevented oil value by reducing oil spillage and total cost's reduction value as the sum of all costs such as clean-up and preventive measures cost, socioeconomic cost, environmental cost. Cost elements include increased construction cost and increased operating cost of double-hulled tankers than those of single-hulled tankers.

This study presents the optimistic scenario, the conservative scenario and the intermediate scenario. As a result, the benefit-cost ratio(BCR) of the conservative scenario showed 0.89 while BCR of the optimistic scenario and the intermediate scenario showed 1.43 and 1.06

respectively, which mean the economic feasibility with the discount rate of 7%. It is judged that the double hull requirements for tank vessels in the U.S. Oil Pollution Act of 1990 will result in economics. Therefore, the analysis results indicate that double-hulled design appropriately reduces the oil spillage and contribute to protect the marine environment.



I. 서론

1. 연구배경 및 목적

최근 해양공간에 대한 이용이 확대되고 1980년대 이후 해상유류무역이 지속적으로 증가함에 따라 해양 폐기물, 유류오염사고 등으로 인해 해양오염이 증가하고 있다. 1995년 7월 우리나라 전남 여천군에서 씨 프린스(Sea Prince)호 좌초 사고로 5,030톤의 원유와 연료유가 유출되는 대량 해양유류유출사고가 발생했다. 이 사고를 계기로 해양유류유출사고가 외국에 국한된 사고가 아닌 우리나라에서도 발생할 수 있다는 경각심을 일으켰다. 그 후, 2007년 우리나라 충남 태안군에서 허베이 스프리트(Hebei Spirit)호의 충돌사고로 원유 10,500톤이 유출되는 국내 최대 해양유류유출사고가 발생하였고, 우리나라는 대형 유조선에 의한 해양유류유출의 위험성을 깨닫게 되었다.

미국의 경우 1989년 3월 24일 미국 알래스카 프린스 윌리엄 사운드에서 발생한 엑슨 발데즈(Exxon Valdez)호 좌초사고로 37,000톤의 원유가 해양으로 유출되는 미국 최악의 해양유류유출사고가 발생했다. 이에 미국은 1990년 8월 유류오염법(Oil Pollution Act of 1990, OPA 90)을 발효함으로써 해양유류유출사고를 예방하기 위한 대책을 법률화하였다. 유류오염법의 주요내용으로는 단일선체 선박의 단계적 폐선, 방제계획, 선박면허와 인원배치의 명시화, 기름유출 사고 시 선주책임의 한계 등이 있으며, 그 중에서 가장 강력한 조항은 미국에 취항하는 모든 유조선의 이중선체 구조 의무화 규정이었다.

신조 유조선의 이중선체 의무화는 1990년 미국 유류오염법(OPA 90)에 의해 처음 도입된 개념으로, 1990년 11월 미국 정부의 제안에 의거하여 국제해사기구(IMO, International Tanker Owners Pollution Federation)는 1991년 국제해사기구 산하 해양환경보호위원회(MEPC, Marine Environment Protection Committee)의 제31차 해양환경보호위원회 회의와 1992년 제32차 MEPC 회의를 통하여 “해양오염 대비, 대응 및 협력에 관한 국제협약(OSRC, International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Cooperation)”을

채택하고, 1995년 5월에 발효함으로써 미국의 이중선체 구조방식 의무를 국제 규격화하였다. 유럽연합에서도 2002년 11월 스페인 연안에서 발생한 단일선체 유조선 프레스티지(Prestige)호 침몰로 6만 3,000톤의 기름이 해양으로 유출되어 20억 유로가 넘는 피해가 발생하자, 2003년 7월 입법 예고한 단일선체 유조선의 운항규제를 같은 해 10월부터 착수하였다. 유럽연합 규제조치의 핵심은 단일선체 유조선의 조기퇴출과 중질유의 운송금지이다. 즉, 일정한 선령에 도달한 선박에 대해서는 기존의 계획과 관계없이 조기에 퇴역시키고, 환경적으로 위대한 중질유는 이중선체 유조선에 의해서만 운송하도록 하는 것이 EU 규제정책의 핵심이다.

전 세계적으로 해양유류유출을 막기 위한 대안으로 이중선체 구조 의무화가 중요시되고 있으며 이는 미국뿐만 아니라 유럽연합, 국제해사기구(IMO)의 법안 및 협약을 통해 우리나라를 포함한 모든 국가의 유조선 건조 시 필수조건이 되었다.

이상의 관점에서 본 연구는 유조선의 이중선체 구조 의무화가 해양오염 감소에 유의한 영향을 주었는지에 대한 Chow 단절점 검증과 경제적 타당성 분석을 하는데 그 목적이 있다. 먼저 미국의 유류오염법(OPA 90) 발효에 따른 이중선체 의무화가 미국 해양유류유출량의 구조적 변동을 가져왔는지에 대한 통계적 분석 방법으로 Chow 단절점 검증을 실시한다. 다음으로 이중선체 도입이 최초로 법제화된 미국을 대상으로 하여 이중선체 도입에 따른 편익과 비용의 경제적 가치를 측정함으로써, 이중선체 구조 의무화가 해양유류유출량의 감소에 유의한 영향을 주었는지에 대해 경제적 타당성 분석을 실시하고자 한다.

2. 연구방법 및 내용

본 연구는 유조선에 대한 이중선체 구조 의무화 규정이 유류오염법(OPA 90)을 통해 미국에서 처음 법제화된 이후 국제해사기구(IMO)를 통해 국제화됨에 따라 이중선체 구조 의무규정이 실제로 해양유류유출량 감소에 유의한 영향을 미쳤는지를 분석하기 위하여 Chow 단절점 검증과 비용-편익분석을 통해 이중선체 도입에 따른 경제적 타당성 분석을 실시하고자 한다. 따라서 이중선체 의무화 규정의 도입에 따른 증가된 유조선 건조비용 및 운영비용과 이중선체 도입으로 감소된 해양유류유출량에 따른 편익을 계산한 후, 비용-편익분석에 의한 경제적 타당성 분석을 실시한다.

본 연구의 내용은 크게 서론, 선행연구, 해양유류유출 현황, 이중선체 도입 및 현황, 실증분석, 결론으로 구성되어 있다.

서론에서는 연구배경 및 목적과 연구방법 및 내용에 대해서 설명하였다. 선행연구에서는 비용-편익분석의 이론적 연구와 이중선체의 도입에 대한 실증연구들을 살펴본다.

해양유류유출 현황에서는 세계 및 미국에서 발생한 해양유류유출에 대한 현황 분석을 실시하고, 이중선체 도입 및 현황에서는 먼저 이중선체의 정의 및 특징에 대해서 살펴보고 이중선체 도입 및 현황에 대해서 살펴본다.

실증분석에서는 크게 Chow 단절점 검증과 비용-편익분석을 실시한다. 먼저 Chow 단절점 검증을 통해 이중선체 의무화가 처음 법제화 이후인 1991년을 기점으로 해양유류유출량에 대한 시계열 자료를 분석함으로써 이중선체 도입이 해양유류유출량 감소에 유의한 영향을 주었는지를 분석한다.

비용-편익분석을 위해 순현재가치법(NPV), 내부수익률(IRR), 편익비용 비율(BCR)의 분석방법을 사용하여 실증모형을 설정하고, 이중선체 도입에 따른 편익과 비용을 추정하여 분석을 실시한다.

결론에서는 실증분석에서 실시한 분석 결과를 요약하고 연구의 한계점에 대해 설명한다.

II. 선행연구

1. 비용-편익 분석의 이론적 연구

비용-편익분석(cost-benefit analysis)은 정부가 수행하는 공공사업 또는 정책의 경제적 타당성을 평가하기 위한 가장 일반적인 분석방법이다. 정부의 공공사업이나 정책을 시행하는데 필요한 비용과 그로인해 발생하는 편익을 측정하고 그에 따른 현재가치를 환산하여 최선의 대안을 선택하기 위한 분석방법이다. 비용-편익분석은 세금, 무역 등과 관련된 다양한 분야에서 정부의 의사결정을 평가하기 위한 분명한 지침서를 제공한다.

비용-편익분석의 특징은 크게 세 가지로 살펴볼 수 있다.

첫째, 비용-편익분석은 정부의 공공사업 또는 정책의 경제적 타당성을 평가하기 위해 사용되므로 기업 차원의 재무적 분석과 달리 국민경제 전체의 관점에서 편익과 비용을 추정해야 한다. 일반 기업의 경우 투자 사업에 대한 경제성을 평가하고자 할 경우, 투자를 시행하는데 필요한 비용과 그에 따른 수입을 비교하여 예상수입에서 예상비용을 뺀 기대이윤이 최대가 되는 사업에 투자하고자 할 것이다. 이 경우 특정 투자 사업에 대한 비용과 수입은 기업에게만 적용되는 사적인 비용과 수입이다. 하지만 비용-편익분석에서의 비용과 편익은 환경재의 질 개선이나 환경오염의 피해와 같이 사회 또는 국가전체의 관점에서 편익과 비용을 추정하여야 한다.

둘째, 비용-편익분석은 정책 목표를 효율적으로 달성할 수 있는 공공사업 또는 정책을 선택하기 위해 사용되므로 정책의 실행가능성에 영향을 미치는 모든 사회경제적, 정치적 요소들을 포함하여야 한다.

셋째, 비용-편익분석에는 비용과 편익이 발생하는 시점이 중요한 요소로 포함된다는 것이다. 공공사업이나 정책은 즉각적인 효과가 나타나는 것이 아니라 대부분 장기간에 걸쳐 효과가 발생하기 때문에 비용과 편익이 발생하는 시점이 공공사업 또는 정책을 선택하는데 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 편익-비용 분석은 장기적으로 발생하는 모든 효과를 종합적으로 평가해야 한다.

비용-편익분석의 개념은 19세기 말 프랑스 경제학자이자 토목 엔지니어인 Jules Dupuit(1844)에 의해 처음 등장하게 되었다는 것이 일반적인 통설이다. 그는 한계효용체감(diminishing marginal utility) 곡선을 소개하고 이를 최적의 교량 통행료 결정하기 위한 공공사업에 최초로 적용하였다. 여기서 소비자 잉여(consumer surplus)라는 개념이 등장하는데 이 개념은 후에 마셜(Marshall)의 소비자 잉여로 발전하게 된다. 이 연구를 통해 결정이 어려웠던 공공사업 또는 정책의 시행여부를 결정할 수 있는 경제학적 타당성을 마련하게 되었다.

비용-편익분석이 본격적으로 개발된 것은 20세기에 들어와 후생경제학(welfare economics)이 발전되고 난 후이다. 후생경제학은 현실 경제사회에서 발생하는 경제현상을 기술하고 분석하여 얻은 일련의 체계적 지식인 실증경제학(positive economics)의 지식을 토대로 하여 경제 현실의 성과를 평가하고 그 개선책을 연구하는 경제학을 말한다. 후생경제학의 주요 연구대상은 공공부문의 사업 또는 정책에 대한 효율성 평가이다. 즉, 사회후생의 극대화라는 전제하에 민간지출과 공공지출 간의 균형을 어떻게 유지시키느냐에 있었다. 이와 같은 후생경제이론을 바탕으로 이를 정부사업에 실제 적용하고자 하는 시도를 처음으로 한 나라는 미국이었다.(김동건, 2008)

미국 정부는 1946년에 미국 홍수방지법(The United States Flood Control Act)을 통과시키면서 “모든 공공기관은 과제 수행 시 투자비와 편익을 평가하여야 하고, 편익의 크기가 반드시 투자비를 초과해야 한다.”고 규정하였다. 하지만 비용과 편익을 어떻게 규정하고 측정해야 하는가에 대한 구체적인 지침은 주어지지 않은 상태였고(Hanley and Spash, 1993), 다양한 정부정책에 관한 경제학적 조서와 분석을 실시하도록 유도하는 차원으로 적용되었다.

현대적 의미의 비용-편익분석 방법이 소개된 것은 1950년부터 작성하기 시작하여 1958년에 완성된 미국의 수자원 관리 보고서인 ‘Green Book’이었다. 이 보고서는 하구관리를 위한 정부 간 합동 위원회 산하의 분과위원회에 작성한 것으로 수자원 관리를 위하여 강 유역 사업들에 대한 타당성을 분석하였다. 이는 경제학적 원칙의 차원에서 비용편익분석을 공공정책 또는 사업 등의 실무에 적용가능 하도록 하였다.(Silva, 2000)

1952년에는 미국 예산관리국(Office of Management and Budget)에서 산하 기관이 제안한 사업을 평가하는 지침을 비용-편익분석을 통해 수립하였고 이는 미국 상원의 공식문서(senate Document 97)로 대체되었고, 1973년에 원리와

기준(Principles and Standards: P&S)¹⁾으로 다시 대체되었다. 이후 1983년 P&S가 너무 엄격하고 복잡하여 현실성이 떨어진다고 판단하여 원리와 지침(Principles and Guidelines: P&G)²⁾을 마련하고 이에 의거하여 비용편익분석을 실시하도록 하였다.

1980년대와 1990년에는 비용편익분석이 많은 나라에서 이루어졌다. 그 이유는 삶의 질 향상과 관련하여 환경의 가치의 중요성을 인식하고 정부의 환경 관련 정책결정에 비용-편익분석을 도입하도록 하였기 때문이다.

우리나라의 경우 공적 성격을 가진 다양한 분야의 개발사업 또는 정책에 대해서 투자분석을 위한 효율적 관리를 시행하도록 노력하고 있다. 1999년 5월 예산회계법령 제9조의 2항(대규모 개발사업의 예산)을 개정하여 총사업비 500억 원 이상의 공공건설사업 또는 공공개발 사업에 대하여 예비타당성 조사를 수행하도록 하고 있으며, 세부지침으로는 항만, 도로, 철도, 수자원부문이 있으며, 부문별로 표준지침이 별도로 마련되어있다.

예비타당성조사를 수행체계를 보면 사업의 개요 및 기초자료를 분석하여 사업의 중요성을 부각시키고, 예비타당성조사의 주요 항목은 기초자료 분석, 경제성 분석, 정책적 분석, 계층화분석법(Alytic Hierarchy Process, AHP)을 활용한 종합평가이다(한국개발연구원, 2004). 경제성 분석에는 수요의 추정, 편익 및 비용의 추정, 비용-편익분석, 민감도 분석, 재무성 분석이 포함되고, 정책적 분석에는 사업수행의 타당성을 평가하기 위한 중요한 사항들인 지역경제 파급효과, 지역낙후도 평가, 국고지원의 적합성, 자원조달계획, 사전환경성 평가 등이 포함된다.

이와 같이 비용-편익분석은 사회후생을 극대화하기 위하여 공공사업 또는 정책의 경제적 타당성 분석을 위한 하나의 의사결정 지침으로 여러 국가에서 사용되고 있다. 비용-편익분석은 개별기업의 사업을 대상으로 실시하는 재무적 분석(Financial Analysis, FA)과는 접근방법이 다르다. 재무적 분석은 민간부문에서 특정 사업으로 인해 발생하는 편익과 비용을 산출하여 분석을 실시하며 환경, 복지와의 같은 관점에 대한 효과를 반영하지 않는다. 이에 반해 비용-편익분석은 공공사업의 특성에 따라 국가적 차원의 복지수준 향상을 목표로 하며, 사회적 이익

1) 정확한 명칭은 Principles and Standards for Planning Water and Related Land Resources이다.
2) 정확한 명칭은 Economic and Environmental Principles and Guidelines for Water and Related Land Resources Implementation Studies이다.

의 측면에서 환경 등에 미치는 모든 영향을 고려하는 포괄적 분석방법이다.

본 연구에서는 비용-편익분석을 통해 미국 유조선의 이중선체 구조 의무화에 따른 경제적 타당성 분석을 실시하고자 한다.



2. 실증연구

1990년 미국 오염방지법(OPA 90)을 통해 이중선체 구조의 의무화가 입법화된 이후 이중선체의 경제성 및 효율성에 대해 다양한 연구가 이루어져 왔다.

미국 국립연구위원회(NRC, National Research Council, 1991)는 설계에 따른 유조선 유류유출 예방에 대해 연구하였다. 유조선 및 바지선에 대한 이중선체가 유류유출을 예방하고 최소화시키는데 효과가 있기 때문에 유조선 유류유출로부터 환경을 보호할 것이라고 서술하였다. 좌초와 선박충돌이 발생하였을 때 유류 유출량을 감소시키기 위한 설계에 대해 실험을 실시하고 유출 가능성과 유출량을 산출하였다. 구체적으로 이중선체 유조선에 의한 유류유출량이 40,000 DWT³⁾ 급 유조선의 경우 30%, 240,000DWT 급 VLCC 이중선체 유조선의 경우 70% 감소시킬 수 있다고 분석하였다.

Brown and Savage(1996)는 미국 연안을 항해하는 유조선에 대한 이중선체 의무화의 경제성을 분석하기 위하여 비용-편익분석을 실시하였다. 이중선체 유조선의 비용은 증가된 건조비와 운영비, 이중선체의 격벽효과로 인해 수송 가능한 유류량의 감소에 따른 추가 선박 건조비, 자중손실(Deadweight loss)비용을 통해 산출하였다. 이중선체 유조선의 편익은 1986년부터 1993년까지의 유류 유출량의 평균값을 계산한 다음 이중선체로 인한 유출량 감소 효과를 추정하여 감소된 유출량의 가치를 평가하였다. 가장 실현 가능한 시나리오의 경우, 기대편익이 기대비용의 20%에 불과했다. 가장 유리한 시나리오에서도 이중선체는 양의 순현재가치(Net present value)를 보이지 않았다. 이중선체가 선박충돌과 좌초로 인해 발생하는 모든 유류 유출량을 예방할 수 있고 유출된 갤런 당 피해가 엑슨 발데즈호(Exxon Valdez) 사고만큼 막대하더라도, 편익은 비용의 절반보다 낮았다.

NRC(2001)는 좌초와 선박충돌에 대한 유조선 설계의 환경성과를 연구하였다. 단일선체 유조선과 이중선체 유조선의 두 가지 유조선 설계와 40,000DWT와 150,000DWT의 두 가지 선박 크기에 대하여 각각 10,000번의 좌초와 10,000번의 선박충돌 실험을 실시함으로써 총 80,000번의 사고시나리오와 유출

3) DWT(Dead Weight Tonnage) : 재화중량톤수. 적재한 화물의 최대중량을 톤 단위로 나타낸 수.

량 산출을 시행하였다. 실험 결과 40,000DWT 크기의 유조선에 대한 좌초 사고의 경우, 이중선체 유조선의 시나리오가 단일선체 유조선의 시나리오에 비해 4.41배 이상 우수하였다. 또한 유출량에 대해서도 이중선체가 단일선체에 비해 6.59배 이하의 유류가 유출되었고, 500,000갤런의 유출량 등가지표에 따르면 20.50배 더 적은 피해가 발생하였다.

Talley et al.(2001)은 미국 유류오염법(OPA 90)이 발효 된 이후의 기간 동안 발생한 선박 사고 유류유출에 대해 연구하였다. 1991년부터 1995년까지의 기간 동안 미국해안경비대(USCG)의 개별 선박사고 자료를 사용하여 토빗 회귀 분석(Tobit regression)을 실시하였다. 선박사고 유류 유출량은 선박유형(유류 화물, 비 유류화물), 사고유형(선박충돌, 폭발, 화재, 좌초, 범람, 장비결함, 침몰, 구조적결함, 전복), 선박특징(크기, 연령, 국기), 기상특징(추운 날씨, 강한바람, 강수량), 가시성(낮, 밤), 선박운영단계(항해, 정박, 견인, 닻), 수로유형(연안, 원양, 강, 항구, 호수, 만)에 의해 영향을 받는다고 가정했다. 분석결과 바지선 사고가 수중 및 육상 모두 다른 선박사고보다 가장 많이 발생하였으며, 유출량도 가장 많았다. 이는 선박사고 유출량을 감소시키기 위해서 바지선에 관한 규정에 더 많은 집중이 필요하다는 것을 암시한다. 수중 및 수외 유류유출량은 미국선박의 경우 더 적었으나 선박이 정박되어 있을 때 더 많이 발생하였다. 또한 정박된 선박 사고의 경우 선박이 항해중이거나 견인 중 닻을 내린 경우보다 2,291갤런 더 많이 유출되었고, 육상 유출사고의 경우 장비결함의 경우가 다른 사고 유형보다 39.8 갤런이 더 유출되었다.

Dikos and Sgouridis(2008)는 해양산업에서 이중선체의 단계적 도입에 대한 매몰비용과 불확실성의 영향에 대해 연구하였다. 1989년 미국에서 발생한 엑스 발데즈호 사고 이후, 1990년 미국은 유류오염법(OPA 90)을 제정하였다. 이 법에서 가장 중요한 조항은 미국 연안에 취항하는 모든 유조선의 이중선체 구조 의무화이다. 몇몇의 연구원들은 전통적인 비용-편익분석을 사용하여 그 법안의 비용 효율성을 분석하였다. 하지만 그들의 연구에는 기술적 발전 또는 다른 시스템의 변화와 같이 잠재하는 선택 요소를 법안 실행의 시점에 포함하지 않았다. 이에 따라 환경정책의 최적시기를 위한 기준모델을 적용함으로써 대기 옵션가치를 연구하였고, 이를 수용할 수 있도록 확대하였다. 이중선체의 단계적 도입의 문제점은 정책상의 효과의 경험적 타당성을 위해 하나의 체제만을 제공하는 것이다. 정부는 특히 유조선 산업과 관련한 정책 변화의 과정을 통해 불확실성을

야기하고, 이는 대기의 실질옵션(Real option of waiting)을 유발한다. 경험적 연구는 유조선 투자 결정의 정책 불확실성의 영향과 신조선에 대한 수요와 관련하여 잠재하고 있는 새로운 규정을 위해 시장의 반응에 초점을 맞춰야 한다고 서술하고 있다.

Homan and Steiner(2008)는 유류 유출 감소에 대한 유류오염법(OPA 90)의 영향을 연구하였다. 1976년부터 2004년까지 미국에서 발생한 해양유류유출 사고(10,000갤런 이상 유출된 사고)에 대한 연간 및 분기별 자료를 이용하여 종속변수를 유류유출 사고건수, 독립변수는 유류거래량, 유조선 척수, 유조선 평균 크기, 유류 가격 그리고 선박수리비용으로 하는 카운트 모델(Count model)을 가정하였고, 유류오염법(OPA 90) 발효 이전기간(1976-1990)과 전체기간(1976-2004)에 대해 분석을 실시하였다. 그 결과 두 기간 모두 유류사고건수가 유류거래량 및 유조선 척수에 대해서는 양의 관계, 유류가격 및 선박수리비용에 대해서는 음의 관계가 나타났다. 또한 유류오염법(OPA 90)이 유류유출 사고 감소에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 1991년을 시작으로 2004년까지 1을 그 이전의 기간에 대해서는 0인 더미변수를 설정하였다. 이 더미변수에 대한 추정된 계수는 음의 상관관계를 보였고 가장 유의한 변수로 분석되었다. 신건조 유조선에 대한 이중선체 요구와 현존 선박에 대한 단계적 퇴출일정과 같은 운영상 조치들이 유류사고 감소에 효과가 있으며, 유류오염법(OPA 90)이 제정되지 않았다면 유류유출 사고건수는 1990년 이후 80% 이상 더 많이 발생하였을 것으로 분석되었다.

Yip et al.(2011)은 해양유류유출 사고 감소에 대한 이중선체의 효율성을 분석하였다. 2001년부터 2008년까지의 기간 동안 미국해안경비대(USCG)의 개별 선박사고 자료 중 유조선 사고 291건, 바지선 사고 802건에 대하여 토빗 회귀 분석(Tobit regression)을 실시하였다. 선박사고 유류 유출량은 사고발생시간(연도), 선박 사고 종류(선박충돌, 폭발, 화재, 좌초, 범람, 장비결함, 침몰), 선박의 특징(선박크기, 선박연령, 선박 국기, 추진력), 사고 시간의 가시성(낮, 밤), 선박운영단계(표류 유무), 선박 선체설계(이중선체, 단일선체)에 의해 영향을 받는다고 가정했다. 그 결과 유조선 사고는 선박 사고 종류 중 선박충돌, 폭발, 화재, 선박 특징에서는 유류 용량, 미국선박, 선박 선체설계에서 이중선체에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 이중선체 유조선이 존재하지 않았다면 유조선 바지선과 유조선 선박사고로 인한 유류 유출량은 더욱 증가하였을 것이며, 평균적

으로 이중선체 유조선의 경우 62%, 유조선 바지선의 경우 20%의 유류유출의 크기를 감소시킨 것으로 분석되었다. 따라서 이중선체 구조는 유류 유출사고 감소에 유의한 영향을 주었으며, 이중선체 구조 의무화 정책은 유조선 바지선 사고에 의한 유류유출을 감소시키는데 더 큰 집중이 필요하다고 서술하고 있다.



3. 실증연구 검토결과

유조선에 의한 해양유류유출 사고를 방지하기 위해 유조선의 이중선체 구조 의무화에 관한 국외 연구들은 경제성 분석과 토빗 회귀분석(Tobit regression), 카운트 모델(Count model)의 분석방법을 사용하여 활발히 이루어졌다. 또한 국내 연구에서도 단일선체 유조선 퇴출의 국제동향, 국제해사기구(IMO) 이중선체 규칙의 채택과 향후 전망과 같은 이중선체 구조 의무화의 현황분석 및 이중선체 벌크 화물선의 경제성 분석 등의 연구가 이루어졌다.

국외연구 중 유류유출량 및 사고건수와 이에 영향을 주는 변수의 관계를 설명하기 위한 다양한 연구가 이루어졌으며, 각 연구에 대한 모형을 정리하면 다음 표와 같다.

이중선체 구조 의무화에 대한 경제성 분석에 관한 연구에는 Brown and Savage(1996)가 있다. 이 연구는 이중선체 구조가 의무화된 1990년 이전인 1986년부터 1993년까지의 자료를 사용하여 유류 유출량을 계산하여 이중선체 유조선의 편익을 추정하였으며, 이중선체로 인한 유류유출 감소비율을 이중선체 구조 의무화 이후의 실제 유류유출 감소비율이 아닌 임의로 정한 3가지 시나리오에 대하여 분석하였기 때문에 이중선체 구조 의무화에 따른 해양유류유출 감소효과가 제대로 고려되지 못한 한계가 있다.

현재까지 국내에서 이중선체 구조 의무화에 대한 경제적 타당성 분석에 관한 연구가 이루어지지 않았으며, 국외에서도 1996년 이후로 이중선체 구조 의무화에 대한 경제적 타당성 분석에 관한 연구가 이루어지지 않았다. 이에 본 연구는 유조선의 이중선체 구조 의무화에 대한 경제적 타당성을 분석하기 위하여 이중선체 구조가 법률화된 이후인 1999년부터 2009년까지 약 12년간의 기간에 대해 이중선체 도입에 따른 해양유류유출량 감소 편익과 비용을 추정하여 비용-편익분석을 실시하고자 한다.

Ⅲ. 해양유류유출 현황분석

1. 세계 해양유류유출에 대한 현황분석

세계적으로 발생한 해양유류유출에 관한 현황은 국제유조선선주오염조사기구(ITOPF, International Tanker Owners Pollution Federation Limited)의 유조선과 운반선, 바지선에 의해 발생한 해양유류유출사고에 대한 통계자료를 토대로 분석하였다. 1970년 이후 세계 해양유류유출 사고에 대한 10년 단위 유류유출 사고 발생건수와 그 비율은 <그림 3-1>과 같다. 1970년대에는 700톤 이상의 대형 유류유출사고 건수가 245건(54%), 1980년대에는 94건(21%), 1990년대에는 77건(17%), 2000년대에는 35건(8%)으로 지속적으로 감소하고 있으며, 2000년대는 1970년대에 비해 7배나 적게 유출사고가 발생하였다.



<그림 3-1> 10년 단위 대형 유류유출(700톤 이상) 발생 건수와 비율(1970-2009)

자료 : ITOPF, Oil Tanker Spill Statistics 2013

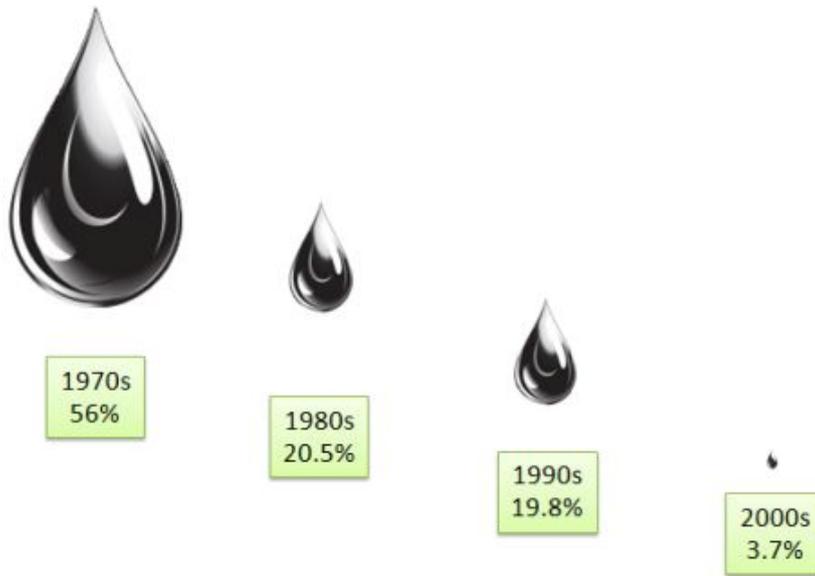
1970년부터 2013년까지 7톤 이상 700톤 미만의 중간규모와 700톤 이상의 대규모 유출 발생건수는 아래 <그림 3-2>와 같다. 중간규모의 유출사고 또한 1970년대 543건에서 2010년대에는 27배나 적은 20건으로 지속적으로 감소하고 있는 추세이다. 700톤 이상의 대규모 유출사고 또한 1970년대 245건에서 2010년대(2010년-2011년)에는 8건으로 30배나 감소하였다.



<그림 3-2> 중간규모(7-700톤)와 대규모(700톤 이상) 유류유출 발생건수(1970-2011)
 자료 : ITOPF, Oil Tanker Spill Statistics 2013

다음으로 세계 유류유출량에 대해서 살펴보면, 1970년부터 2009년까지 세계 해양유류유출량에 대한 10년 단위 비율은 <그림 3-3>과 같다. 1970년대 발생한 유출량은 약 3백만 2천 톤으로 전체 유출량의 56%에 해당하고, 1980년대 발생한 유출량은 약 1백만 2천 톤으로 전체 유출량의 20.5%에 해당한다. 1990년대에는 약 1백만 1천 톤으로 전체 유출량의 19.8%, 2000년대에는 약 2천 톤으로 전체 유출량의 3.7%에 해당한다.

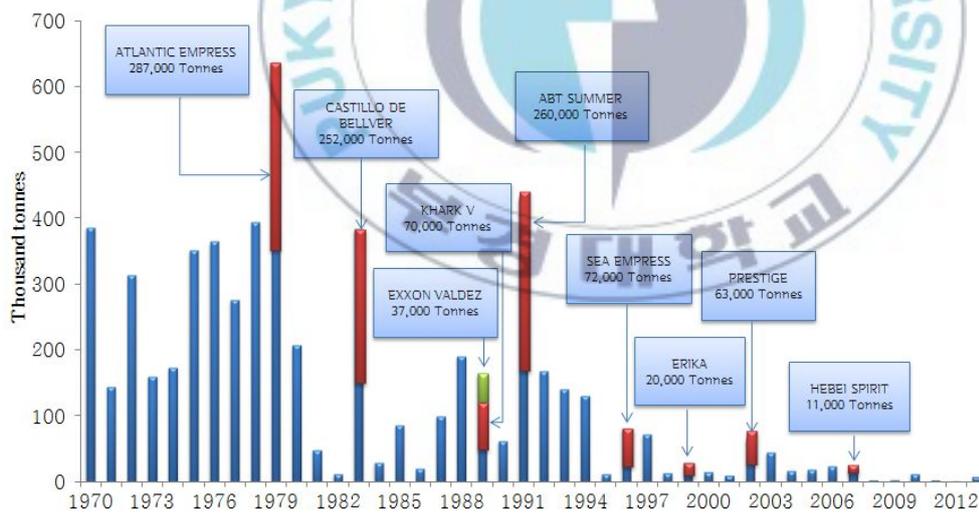
세계 유류유출량 또한 유출 사고건수와 마찬가지로 지속적으로 감소하고 있으며 2000년대는 1970년대에 비해 15배나 적은 유류가 유출되었다.



<그림 3-3> 10년 단위 총 유류유출량의 비율(1970-2009)

자료 : ITOPF, Oil Tanker Spill Statistics 2013

1970년부터 2012년까지 발생한 7톤 이상 유류유출량 및 대형 유류유출사고는 아래의 <그림 3-4>와 같다.

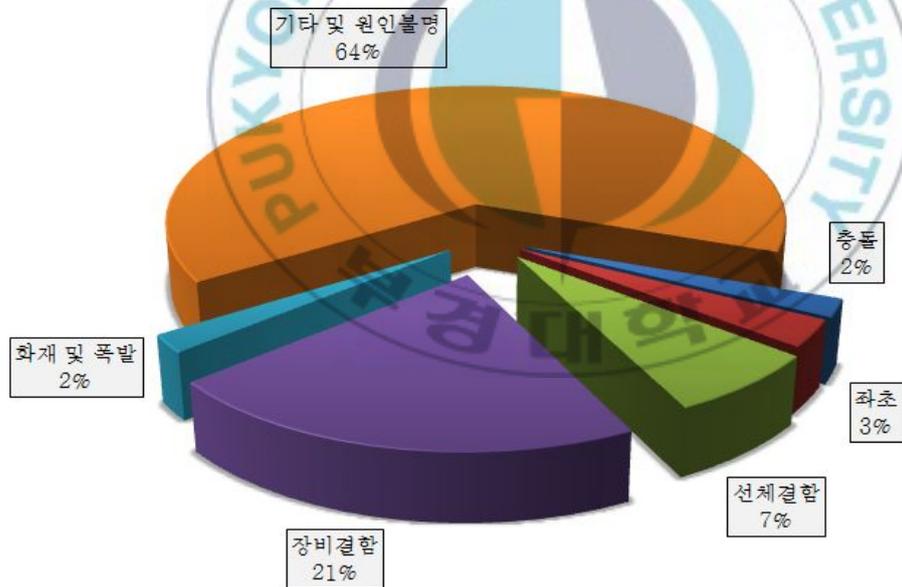


<그림 3-4> 7톤 이상 유류유출량 및 대형 유류유출사고(1980년-2013년)

자료 : ITOPF, Oil Tanker Spill Statistics 2013

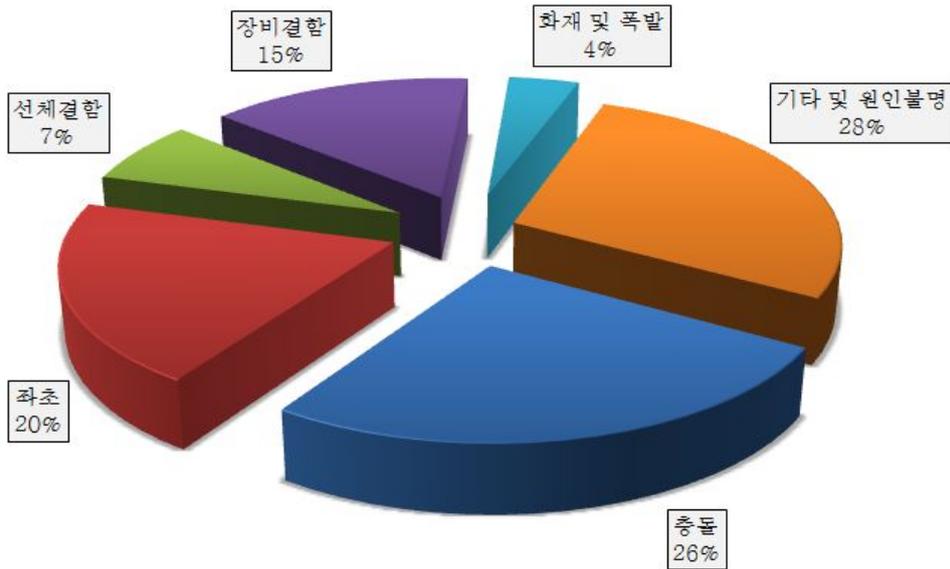
세계해양유류유출사고가 발생하는 주요 원인은 충돌(allisions/collisions), 좌초(groundings), 선체결함(hull failures), 장비결함(equipment failures), 화재 및 폭발(fires/explosions), 기타/원인불명(other/unknown)이 있으며, 기타원인은 기상악화로 인한 사고와 인간의 오작동과 같은 사고를 포함한다. 유류유출량 크기에 따라 7톤 미만의 소규모, 7톤 이상 700톤 미만의 중규모, 700톤 이상의 대규모 유출사고에 대한 세계 해양유류유출의 원인에 대해서 살펴보면 다음 <그림 3-5>, <그림 3-6>, <그림 3-7>과 같다.

모든 사고의 95%는 소규모와 중규모의 유류유출이 발생하고, 5%만이 대규모 유류유출을 발생시킨다. 7톤 미만의 소규모 유출사고의 경우 기타 및 원인불명이 64%로 대부분을 차지하고 있으며, 이를 제외하였을 때 장비결함이 21%로 가장 많고, 다음으로 선체결함이 7%, 좌초가 3%, 충돌과 화재 및 폭발이 각각 2%를 차지하였다. 7톤 이상 700톤 미만의 중규모 유출사고의 경우는 28%인 기타 및 원인불명을 제외하였을 때, 충돌과 좌초가 각각 26%, 20%로 절반 가까이 차지하였으며, 장비결함이 15%, 선체결함이 7%, 화재 및 폭발이 4%를 차지하였다. 700톤 이상의 대규모 유출사고의 경우 좌초가 33%로 가장 많았으며, 충돌이 30%, 선체결함이 13%를 차지하였다.



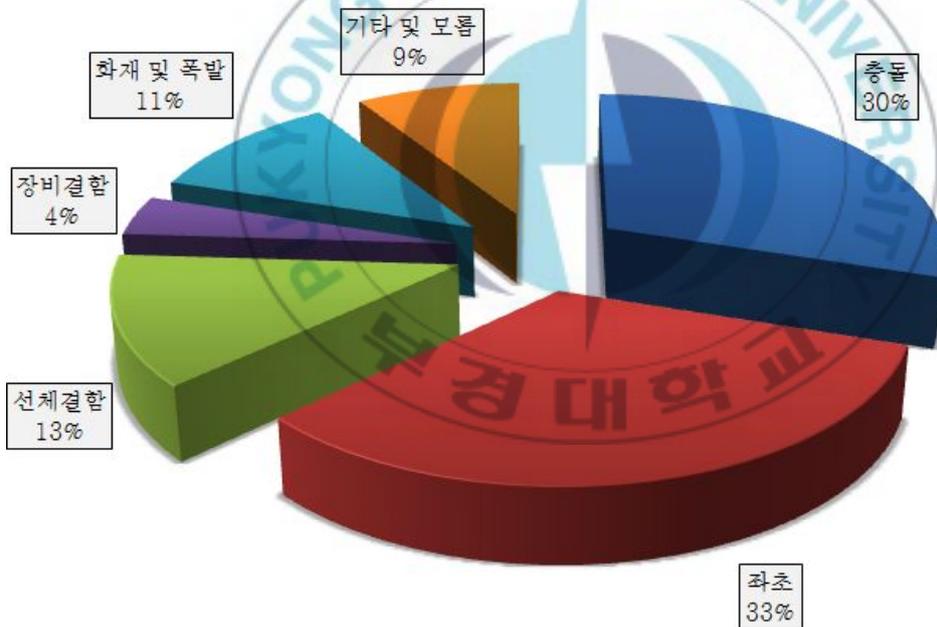
<그림 3-5> 7톤 미만의 세계유류유출 사고원인(1974-2013)

자료 : ITOPF, Oil Tanker Spill Statistics 2013



<그림 3-6> 7톤 이상 700톤 미만의 세계유류유출 사고원인(1974-2013)

자료 : ITOFF, Oil Tanker Spill Statistics 2013



<그림 3-7> 700톤 이상의 세계유류유출 사고원인(1974-2013)

자료 : ITOFF, Oil Tanker Spill Statistics 2013

1967년 토리 캐니언(Torrey Canyon)호 사고 이후 발생한 세계 주요 유류유출사고에 관한 요약은 아래의 <표 3-1>과 같다. 세계 최대 유류유출사고인 애틀랜틱 엠프레스(Atlantic Empress)호 사고는 1979년 서인도의 토바고 부근에서 발생하였으며 유출규모는 28만 7천 톤으로, 1989년 미국에서 발생한 엑슨 발데즈호(Exxon Valdez)의 유류유출량 3만 7천 톤의 7.7배, 2007년 우리나라에서 발생한 허베이 스피리트호(Hebei Spirit) 사고의 유류유출량인 1만 1천 톤의 27배에 해당한다.

<표 3-1> 주요 해양 유류유출 사고(1967년 이후)

순위	사고 선박	발생연도	사고장소	유출규모 (tonnes)
1	Atlantic Empress	1979	Off Tobago, West Indies	287,000
2	ABY Summer	1991	700 nautical miles off Angola	260,000
3	Castillo de Bellver	1983	Off Saldanha Bay, South Africa	252,000
4	Amoco Cadiz	1978	Off Brittany, France	223,000
5	Haven	1991	Genoa, Italy	144,000
6	Odyssey	1988	700 nautical miles off Nova Scotia, Canada	132,000
7	Torrey Canyon	1967	Scilly Isles, UK	119,000
8	Sea Star	1972	Gulf of Oman	115,000
9	Irenes Serenade	1980	Navarino Bay, Greece	100,000
10	Urquiola	1976	La Coruna, Spain	100,000
15	Aegean Sea	1992	La Coruna, Spain	74,000
20	Prestige	2002	Off Galicia, Spain	63,000
35	Exxon Valdez	1989	Prince William Sound, Alaska, USA	37,000
131	Hebei Spirit	2007	Taeann, Republic of Korea	11,000

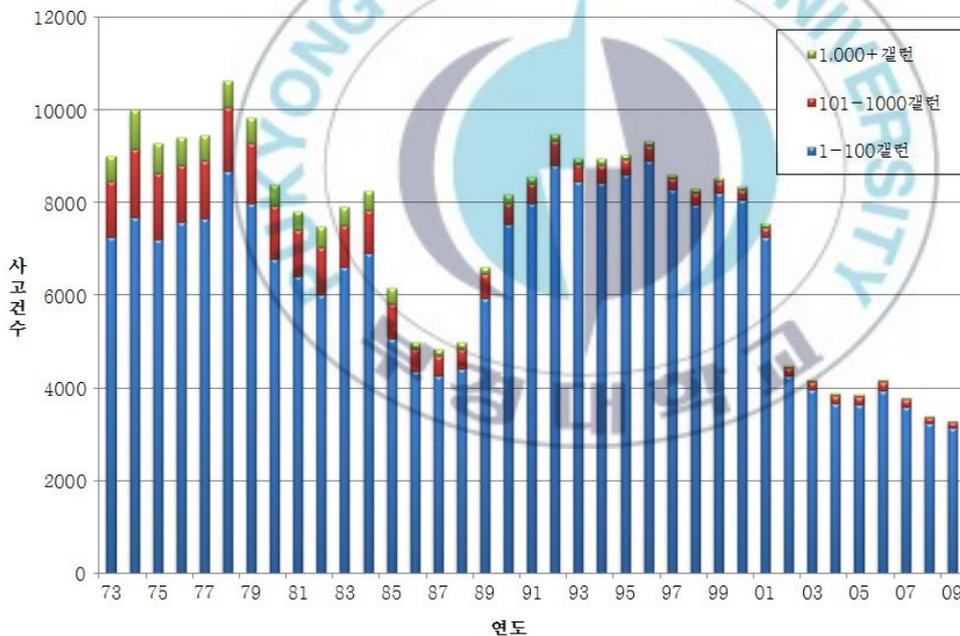
자료 : ITOPF, Oil Tanker Spill Statistics 2013

2. 미국 해양유류유출에 대한 현황분석

미국 해양유류유출에 대한 현황은 미국해안경비대(USCG, United States Coast Guard)의 미국에서 발생한 오염사고 통계량을 바탕으로 분석한다.

미국의 경우 유류 또는 위험물질에 대한 유출에 관하여 수질오염방지법(Clean Water Act)로 알려진 연방수질오염방지법(FWPCA, Federal Water Pollution Control Act)에서 규정하고 있다. 1972년 연방수질오염방지법(FWPCA)이 제정되기 이전까지 수질오염규정은 1899년의 폐기물법(The Refuse Act)과 1924년의 유류오염법(OPA 90)에 의해 이루어졌다.

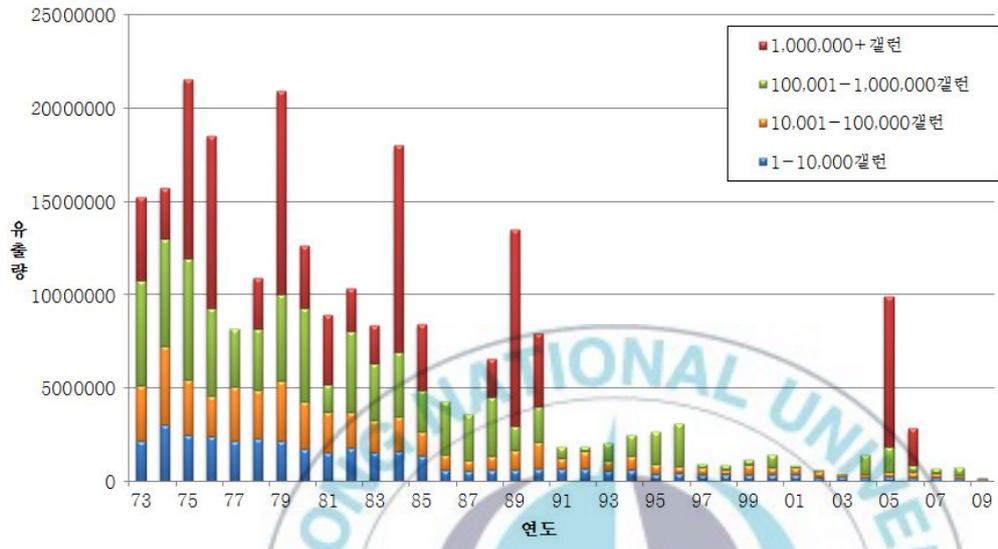
1973년부터 2009년까지 발생한 유출사고 건수를 유출 크기에 따라 나타낸 그래프는 다음 <그림 3-8>과 같다. 보고서에 나타난 기간 동안 미국에서 발생한 유류유출사고는 약 90%가 1갤런 이상 100갤런 미만의 소규모 유출사고로부터 발생했다.



<그림 3-8> 유출 크기에 따른 사고 건수(1973-2009)

자료 : USCG, Polluting Incidents In and Around U.S. Waters, 2011

1973년부터 2009년까지 발생한 유출량을 유출 크기에 따라 나타낸 그래프는 다음 <그림 3-9>과 같다. 보고서에 나타난 기간 동안 전체 유출량의 67.8%가 100,000갤런 이상의 대규모 유출사고로 인해 발생했다. 1991년부터 2004년 사이에는 100만 갤런 이상의 유출이 없었으나, 2005년 허리케인 카트리나(Katrina)로 인해 약 800만 갤런이 루이지애나 주에서 유출되었다.

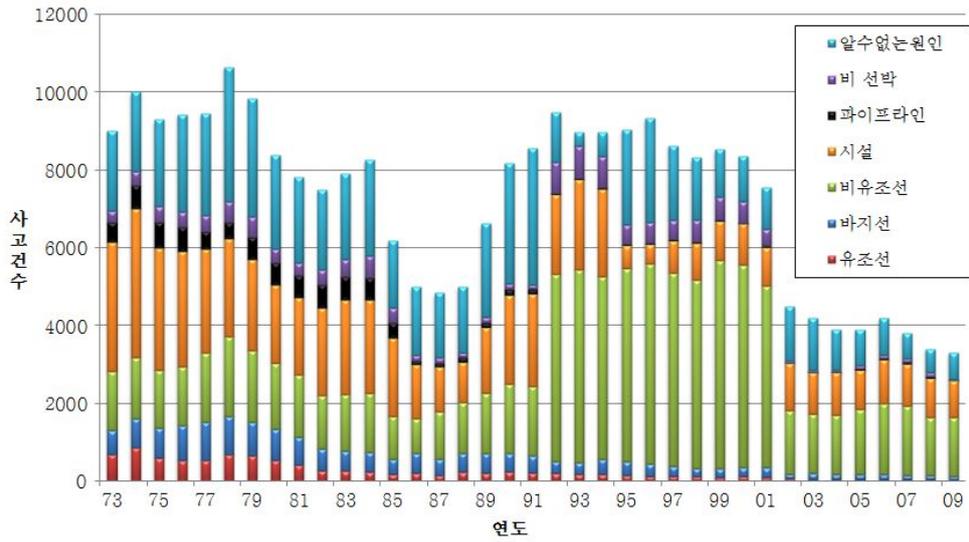


<그림 3-9> 유출크기에 따른 유출량(1973-2009)

자료 : USCG, Polluting Incidents In and Around U.S. Waters, 2011

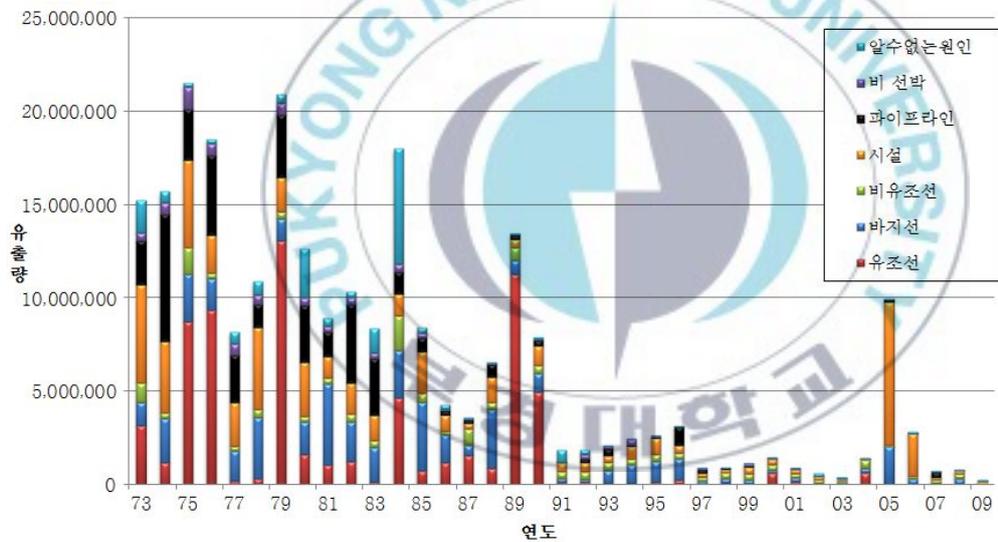
원인에 따른 미국 해양유류유출 사고건수 및 유출량은 다음 <그림 3-10>, <그림 3-11>과 같다. 1973년부터 2009년까지 발생한 유출 사고건수는 비유조선(34%)에 의해 가장 많이 발생하였으며, 25%는 알 수 없는 원인, 24%는 시설, 6%는 바지선, 5%는 비 선박, 3%는 유조선과 파이프라인에 의해 발생하였다. 유출량의 경우는 유조선(27%)에 의해 가장 많이 유출되었으며, 22%는 시설, 18%는 바지선, 16%는 파이프라인, 7%는 알 수 없는 원인, 6%는 비유조선, 3%는 비 선박에 의해 유출되었다.

원인에 따른 미국 해양유류유출 사고건수는 비 유조선에 의해 가장 많이 발생하였지만, 유출량은 소수의 유조선 사고(3%)에 의해 가장 많은 유출(27%)이 발생하였음을 알 수 있다.



<그림 3-10> 사고 원인에 따른 건수(1973-2009)

자료 : USCG, Polluting Incidents In and Around U.S. Waters, 2011



<그림 3-11> 사고 원인에 따른 유출량(1973-2009)

자료 : USCG, Polluting Incidents In and Around U.S. Waters, 2011

미국해안경비대(USCG) 보고서를 통해 미국에서 발생한 유출사고의 현황을 다음과 같이 분석할 수 있다. 유출 사고건수는 1갤런과 100갤런 사이가 가장 많지만, 대규모 유출사고는 대부분 소수의 사고로부터 발생하였다. 미국에서 가장 많은 유출량이 발생한 곳은 미시시피 주, 오하이오 주, 아칸소 주의 강이 포함된 멕시코 만과 서부 하계이다.

미국에서 발생한 유출사고의 원인으로는 유조선(선박/바지선)이 가장 많은 유출량을 차지하였으나, 1990년 유류오염법(OPA 90)이 제정된 이후 유류유출량의 분포는 비 유조선 선박(non-tank vessel)으로 변화하였다.

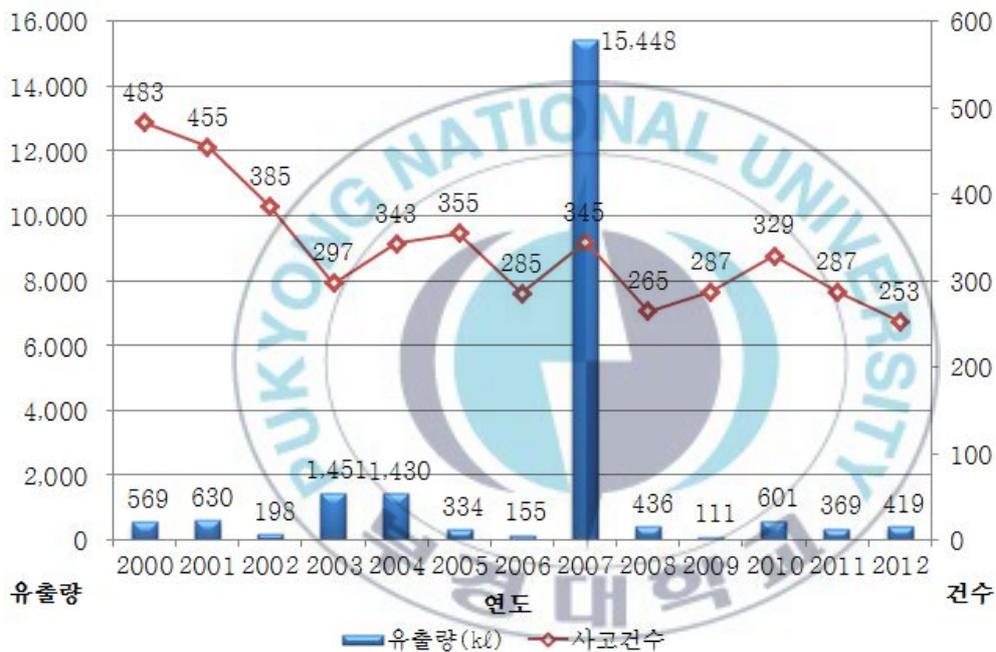
미국 수역에서 발생한 유류유출량은 1973년 이후 지속적으로 감소하는 추세이며, 2009년의 연간 유출량은 211,600갤런으로 1970년대의 연간 유출량 15,848,162갤런에 비해 74배나 적게 유출되었다.



3. 우리나라 해양유류유출에 대한 현황분석

우리나라의 해양유류유출 오염사고에 대한 현황은 해양수산부의 해양오염사고에 관한 연간자료를 바탕으로 분석하였다.

우리나라의 해양오염사고 발생건수는 세계 및 미국 유류유출 사고감소에 비해 소폭이지만 점차 감소하는 추세에 있으며 2012년에는 2000년 483건에서 비해 절반 정도인 253건의 사고가 발생했다. 해양오염사고 유출량은 증가와 감소를 반복하다가 2007년 태안에서 발생한 허베이 스피리트호 충돌사고로 12,547kl의 기름이 유출되어 유례없는 증가를 기록하였다.

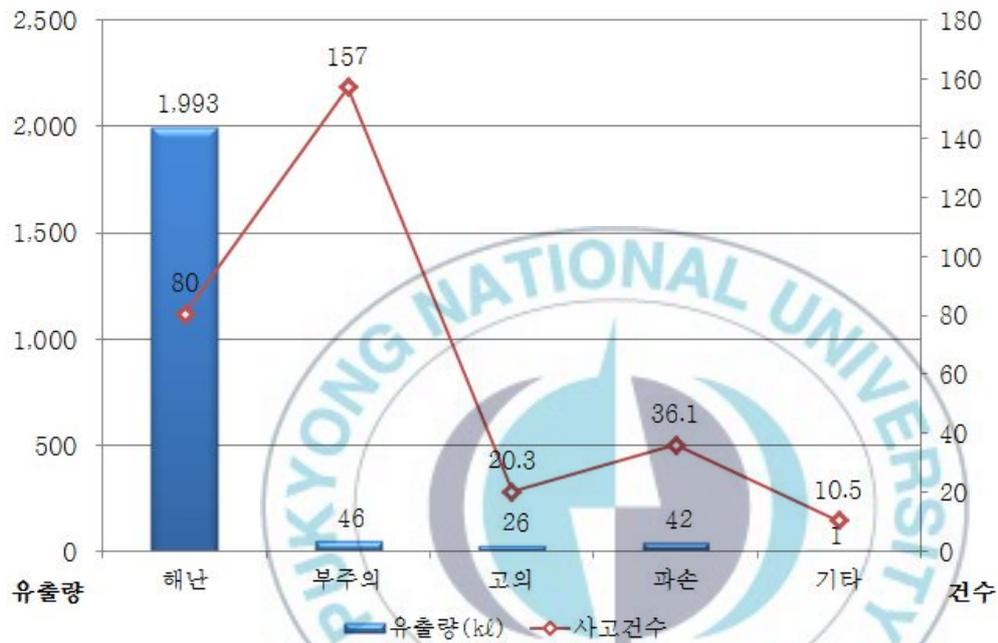


<그림 3-12> 우리나라 해양오염사고 기름 유출량 및 사고건수
 자료 : 해양수산부, 「해양경찰백서」 각 년도

2003년부터 2012년까지 최근 10년간 우리나라에서 발생한 해양유류유출사고 원인별 연평균 유출량을 살펴보면 해난이 1,993kl(95%)로 가장 많았으며, 부주의 46kl(2.2%), 파손 42kl(2%), 고의 26kl(1.2%), 기타 1kl(0.1%)순으로 나

타났다. 연평균 사고건수는 부주의가 157건(52%)으로 가장 많았고 해난 80건(26%), 파손 36건(12%), 고의 20건(7%), 기타 11건(3%) 순으로 발생하였다.

우리나라의 해양유류유출 사고 원인별 유출량 및 유출사고에 대해서 살펴보면 2003년부터 2012년까지 발생한 사고 중 해난으로 발생한 사고의 연평균 유출량이 전체 유출량의 95%(1,993kl)로 가장 많다는 것을 알 수 있는데 그 이유는 선박에서의 해난사고는 선박자체의 침수 또는 침몰을 동반하므로 유출이 쉽게 이루어지기 때문이다.



<그림 3-13> 최근 10년간 사고원인별 평균 유출량 및 사고건수

자료 : 해양수산부, 「해양경찰백서」 각 년도

2003년부터 2012년까지 최근 10년간 우리나라에서 발생한 해양유류유출사고 오염원별 연평균 유출량을 살펴보면 유조선이 1,554kl(73.7%)로 가장 많았으며, 기타선 344.4kl(16.3%), 화물선 77.7kl(3.7%), 육상 70.6kl(3.3%), 어선 59.7kl(2.8%), 기타 1.05kl(0.05%)순으로 나타났다. 연평균 사고건수는 어선 125건(41%)으로 가장 많았고 기타선 66건(22%), 화물선 39건(13%), 육상 38건(12%), 유조선 28건(9%), 기타 9건(3%) 순으로 발생하였다.

우리나라의 해양유류유출 사고 원인별 유출량 및 유출사고에 대해서 살펴보면 유출량에 대해서는 유조선이 월등히 많았고, 사고건수는 어선이 가장 많았다. 해양유류유출사고의 유출량의 대부분은 유조선에 의한 소수의 사고로부터 대량 유출되었음을 확인할 수 있다.



<그림 3-14> 최근 10년간 오염원별 평균 유출량 및 사고건수
 자료 : 해양수산부, 「해양경찰백서」 각 년도

4. 해양유류유출에 대한 현황 분석결과

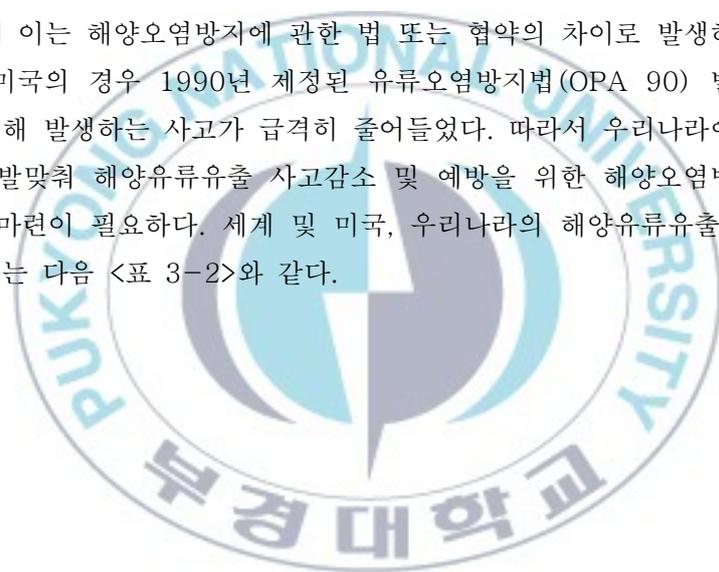
세계 및 미국, 우리나라의 해양유류유출사고 현황에 대해서 분석한 결과, 세계와 미국의 해양유류유출사고의 경우, 사고건수 및 유출량이 1970년대 이후 지속적으로 감소하고 있으나 우리나라의 경우는 유출사고건수가 소폭 감소하고 있으며 유출량은 증가와 감소를 반복하며 특정한 추세가 없었다.

유출크기에 따른 유출사고에 대해서 분석한 결과, 세계 해양유류유출사고의 경우 1970년대 700톤 이상의 대형사고가 전체사고의 약 70%를 차지할 정도로 많이 발생하였으나 1980년대부터 현재까지 대형사고 발생건수 및 전체사고에서 차지하는 비중이 지속적으로 감소하였으며, 2000년대에는 대형사고가 연간 3건이 발생하였고 이는 전체사고의 15%를 차지하였다. 하지만 대형사고의 발생건수 및 비중은 감소하고 있으나 1990년대 전체 유출량의 73%가 단지 10건의 사고에 의해 유출되었고, 2000년대 전체 유출량의 54%가 4건의 사고에 의해 유출되었다. 미국 해양유류유출사고의 경우 1갤런 이상 100갤런 미만의 소규모 유출사고가 약 88%로 가장 많았으나, 전체 유출량의 67.8%가 대규모 유출사고로 인해 발생하였다. 우리나라 해양유류유출사고의 경우 2009년부터 2011년까지 3년간 평균 유출크기에 대해서 살펴보면 5톤 미만의 소규모 유출사고가 약 40%로 가장 많았으며 500톤 이상의 대규모 유출사고는 8%로 가장 적었다.

다음으로 유출원인에 따른 유출사고에 대해서 분석한 결과, 세계 해양유류유출사고의 경우 7톤 미만의 소규모 유출사고의 경우 기타 및 원인불명이 65%로 대부분을 차지하고 있으며, 이를 제외하였을 때 장비결함이 21%로 가장 많았다. 7톤 이상 700톤 미만의 중규모 유출사고의 경우는 28%인 기타 및 원인불명을 제외하였을 때, 충돌과 좌초가 각각 26%, 20%로 절반 가까이 차지하였으며, 700톤 이상의 대규모 유출사고의 경우 좌초가 33%로 가장 많았으며, 충돌이 29%, 선체결함이 13%를 차지하였다. 미국 해양유류유출 사고는 비유조선(34%)에 의해 가장 많이 발생하였으며, 25%는 알 수 없는 원인, 24%는 시설, 6%는 바지선, 5%는 비 선박, 3%는 유조선과 파이프라인에 의해 발생하였다. 유출량의 경우는 유조선이 27%로 가장 많이 유출되었으며, 22%는 시설, 18%는 바지선, 16%는 파이프라인, 7%는 알 수 없는 원인, 6%는 비유조선, 3%는 비 선박에 의해 유출되었다. 원인에 따른 미국 해양유류유출 사고건수는 비 유조

선에 의해 가장 많이 발생하였지만, 유출량은 소수의 유조선 사고(3%)에 의해 가장 많은 유출(27%)이 발생하였음을 알 수 있다. 우리나라의 경우, 최근 10년간 해양유류유출 사고원인에 대해서 살펴보면 해난으로 발생한 사고의 연평균 유출량이 전체 유출량의 95%(1,993kl)로 가장 많다는 것을 알 수 있는데 그 이유는 선박에서의 해난사고는 선박자체의 침수 또는 침몰을 동반하므로 유출이 쉽게 이루어지기 때문이다. 다음으로 오염원별 연평균 유출량을 살펴보면 유조선이 73.7%로 가장 많았으며, 기타선 16.3%, 화물선 3.7%, 육상 3.3%, 어선 2.8%, 기타 0.05% 순으로 나타났다. 연평균 사고건수는 어선 41%로 가장 많았고 기타선 22%, 화물선 13%, 육상 12%, 유조선 9%, 기타 3% 순으로 발생하였다. 따라서 원인에 따른 우리나라 해양유류유출 사고건수는 어선에 의해 가장 많이 발생하였지만, 유출량은 미국과 마찬가지로 소수의 유조선 사고(9%)에 의해 가장 많은 유출(73.7%)이 발생하였다.

세계 및 미국과 우리나라의 유류유출사고는 유출량 및 사고발생건수에서 상당한 차이를 보이는데 이는 해양오염방지에 관한 법 또는 협약의 차이로 발생하는 것으로 추정된다. 미국의 경우 1990년 제정된 유류오염방지법(OPA 90) 발효 이후 유조선으로 인해 발생하는 사고가 급격히 줄어들었다. 따라서 우리나라에서도 국제적 흐름에 발맞춰 해양유류유출 사고감소 및 예방을 위한 해양오염방지와 관련된 법제도 마련이 필요하다. 세계 및 미국, 우리나라의 해양유류유출 현황에 대한 분석결과는 다음 <표 3-2>와 같다.



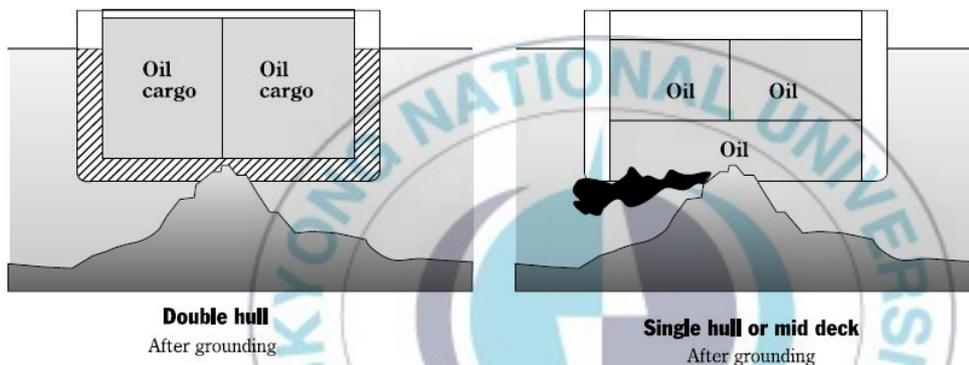
<표 3-2> 세계 및 미국, 한국 해양유류유출 현황분석

구분	세계 해양유류유출	미국 해양유류유출	우리나라 해양유류유출
사고건수	· 1970년대 이후 지속적으로 대폭 감소	· 1970년대 이후 지속적으로 감소	· 2000년 이후 소폭 감소
유출량	· 1970년대 이후 지속적으로 대폭 감소 · 1990년 이후 급격히 감소	· 1970년대 이후 지속적으로 감소 · 1990년 이후 급격히 감소	· 허베이 스피리트호 사고가 발생한 2007년을 제외하면 거의 변화하지 않음
사고원인	· 소규모 사고는 기타/원인불명으로, 중규모 사고 또한 기타/원인불명 가장 많았고, 충돌과 좌초가 절반 정도 차지함 · 대규모 사고의 경우 좌초가 충돌에 의해 가장 많이 발생함	· 사고건수는 비 유조선(34%)에 의해 가장 많이 발생하였지만, 유출량은 소수의 유조선 사고(3%)에 의해 가장 많은 유출(27%)이 발생함	· 사고건수는 어선(41%)에 의해 가장 많이 발생하였지만, 유출량은 소수의 유조선 사고(9%)에 의해 가장 많은 유출(73.7%)이 발생함
대표적인 사고	· Atlantic Empress호(1979) : 287천 톤	· Exxon Valdez호(1989) : 37천 톤	· Hebei Spirit호(2007) : 11천 톤
특이동향	· 대규모 유출사고가 좌초, 충돌에 의해 가장 많이 발생함	· 사고원인이 유조선에서 1990년 이후 비유조선으로 변화함	· 어선에 의한 사고가 가장 많이 발생하나 소수의 유조선 사고로 가장 많은 유출이 발생함

IV. 이중선체 도입 및 현황

1. 이중선체의 정의 및 특징

이중선체(Double Hull) 구조는 기존의 한 겹의 선체로 이루어진 단일선체와 달리 선체의 하부 및 측면을 공간이 있는 두 층의 강판으로 하는 구조로, 충돌 또는 좌초 사고가 발생하여 선체외판의 일부가 손상되더라도 선체내판이 기름유출을 막아 환경오염 방지하는 것을 목적으로 한다.



<그림 4-1> 좌초 후 이중선체와 단일선체 유조선의 비교

자료 : DF Dickins Associates Ltd., The double hull issue and oil spill risk on the pacific west coast, 1995

국제해사기구(IMO)는 향후 신조선에서 선택 채용해야 할 구체적인 방안으로 이중선체구조(Double hull construction)와 중간갑판구조(mid-height deck construction)를 제정하고 있다. 중간갑판구조는 선측은 이중구조이지만 바닥은 단엽구조에 수압균형방식을 사용한다. 중간갑판구조와 비교하여 이중선체구조의 특징을 살펴보면 다음과 같다.(임종식, 1992)

첫째, 건조비용의 측면에서 이중선체구조는 기존 유조선에 비하여 약 15%의 과외비용이 발생하지만 건조 경험 및 기술의 축적으로 경비절감 연계가능성이

있다. 중간갑판구조 또한 이중선체구조의 거의 비슷한 수준의 과외비용이 발생하지만 선박건조 자동화에 다소 유리하다.

둘째, 운항의 측면에서 이중선체구조는 창내 구조물이 간단하므로 세척이 용이하고 창내 잔류물이 남지 않으며 화물의 보온효과로 가열 코일(Heating Coil)의 설치에 유리하나 창내 화재 발생 시 냉각(Cooling)이 어렵다는 문제점이 있다. 중간갑판구조의 경우 창내 돌출물이 증가하여 갑판이 두 개가 되므로 잔류물이 많이 누적되게 된다. 또한 선저면에 해수온도가 직접 전달되므로 가열 코일 설치량이 증가한다.

셋째, 보수의 측면에서 이중선체구조는 비 접근성 공간이 최대가 되므로 도장상태가 손상되기 시작하면 장기적으로 구조물의 부식을 야기하게 된다. 그리고 이중저 부분의 환기, 통풍에 어려움이 있다. 중간갑판구조는 이중선체에 비하여 빈공간이 줄어들고 접근성이 용이하여 선체의 보수 및 수리에 유리하나 부속장치가 복잡해져 속구의 보수 및 유지에는 불리하다.

넷째, 안전성의 측면에서 이중선체구조는 구조적으로 화물창과 접촉되어 있는 빈 공간이 가장 크며 선체 균열 등에 의한 가스의 누적으로 폭발의 위험이 있으나 통계적인 측면에서는 긍정적으로 보고 있다. 중간갑판구조는 이중선체에 비하여 화물과 발라스트의 접촉 면적이 적으므로 비교적 폭발의 위험성이 적다.

다섯째, 충돌의 경우 이중선체구조는 가벼운 충격에는 효과가 있으나 큰 충돌에는 취약한 편이다. 중간갑판구조는 하부화물창까지 손상을 입더라도 대류현상에 의하여 서서히 손상부위까지만 유출되므로 비교적 안전하고 시간적 여유도 있으나 중간갑판이 파손되는 경우에는 문제가 크다.

여섯 번째, 좌초의 경우 이중선체구조는 내 외접의 폭이 통상 1~2미터 정도로서 약한 접촉에는 효과적이지만 대형선의 경우 세찬 접촉이나 간만의 차이에 의한 2차 충격에 의해 화물창까지 손상 우려가 있다. 중간갑판구조의 경우 선저 손상의 화물창 내외부의 압력차이 때문에 유출이 없고 하부 화물창 내에 해수층이 형성되어 안전하지만 좌초 후 선체의 운동, 간만의 차이, 대류현상 등에 의한 소량의 기름 유출에 발생할 수 있다.

2. 이중선체의 도입 및 현황

1989년 3월 24일 알래스카 프린스 윌리엄 사운드에서 1,090만 갤런의 원유를 유출한 엑슨 발데즈(Exxon Valdez)호의 좌초사고로 약 32억 달러의 해양유류오염 피해가 발생하였다. 엑슨 발데즈호 사건 이후 미국의회는 1990년 8월 유류오염법(OPA 90)을 발효하였다.

유류오염법(OPA 90)은 유류 유출을 예방하고 대응하기 한다는 목적을 구현하기 위하여 연방정부에게 이에 필요한 자원 조달 및 기존의 집행권을 강화하는 등의 권한을 부여하고 있다. 동시에 유류 오염을 방지하고 대응하기 위한 주정부의 권한을 배제하고 있지 않아 주정부가 동법에서 정하는 책임한도액보다 많은 책임 또는 무한책임을 부과하거나 제거 범위의 확대 또는 형사 처벌을 강화하는 법률을 제정하는 것을 허용하고 있다.⁴⁾ 유류오염법은 총 4개장, 33개 조항이며 제1장에는 유류오염 책임 및 보상(Oil Pollution Liability And Compensation), 제2장에는 엑슨 발데즈 호 사고가 발생한 프린스 윌리엄 사운드 관련 조항들(Prince William Sound Provisions), 제3장에는 잡칙규정(Miscellaneous), 제4장에는 유류오염에 대한 연구 및 개발 계획에 관한 규정들(Oil Pollution Research And Development Program)로 구성되어 있다.

유류오염법(OPA 90)의 조항 중 유류유출 사고건수 및 유출량을 감소시키기 위한 조항에는 유조선의 이중선체 요구조건인 설립(Establishment of Double Hull Requirements for Tank Vessels), 유출원인에 대한 규제 및 방지(Source Control and Containment), 이중선체를 제외한 현존 유조선에 대해 긴급 라이터링 장비와 사전통보 요구조건(Emergency Lightering Equipment and Advance Notice of Arrival Requirements for Existing Tank Vessels without Double Hulls), 이중선체를 제외한 현존 유조선으로부터 유류유출의 감소시키기 위한 운영상의 조치(Operational Measures to Reduce Oil Spills from Existing Tank Vessels without Double Hulls), 허가, 증명서 그리고 선원들의 서류(Licenses, Certificates, and Mariners' Documents), 수질오염 과징금을 위한 재정책임(Financial Responsibility for Water Pollution Civil Penalties), 국가계획 및 대응시스템: 유조선 대응 계획(National Planning and

4) 33. U.S.C. § 2718(a).

Response System: Tank Vessel Response Plans), 유조선과 시설대응계획하의 장비 및 인사 요구조건(Equipment and Personnel Requirements under Tank Vessel and Facility Response Plans)이 있으며, 이에 대한 효과를 정리하면 다음 <표 4-1>과 같다.

본 연구는 유류유출 감소에 영향을 주는 유류오염법(OPA 90) 핵심 조항 중 유조선의 이중선체 요구조건의 설립에 대한 효과에 대해 연구하였다.

<표 4-1> 유조선 및 바지선에 대한 유류오염법 핵심 조항의 효과

OPA 90	소제목	감소된 악영향	유조선	바지선
90-051	Double Hulls	· 유류유출 사고건수 · 유출된 유류량	◆	◆
90-068 SCC	Spill Source Control and Containment	· 선박 사망자 수 · 유류유출 사고건수 · 유출된 유류량 · 유출된 유류 잔량	◆ ◆ ◆ ◆	◆ ◆ ◆ ◆
91-045L	Lightering of Single Hull Vessels	· 유류유출 사고건수 · 유출된 유류량	◆ ◆	◆ ◆
91-0450	Operational Measures for Single Hull Vessels	· 선박 사망자 수 · 유류유출 사고건수 · 유출된 유류량	◆ ◆ ◆	◆ ◆ ◆
91-211 91-212 91-233 94-101	Licenses, Certificates, and Mariners' Documents	· 선박 사망자 수 · 유류유출 사고건수 · 유출된 유류량	◆ ◆ ◆	◆ ◆ ◆
91-005	Financial Responsibility	· 선박 사망자 수 · 유류유출 사고건수 · 유출된 유류량	◆ ◆ ◆	◆ ◆ ◆
91-034 VRP	Vessel Response Plans	· 유류유출 사고건수 · 유출된 유류량 · 유출된 유류 잔량	◆ ◆ ◆	◆ ◆ ◆
91-034 E&P	PWS E&P Requirements	· 유출된 유류 잔량	◆	

자료 : National Transportation Systems Center, OPA 90 Programmatic Regulatory Assessment(PRA), 2001.

유류오염법(OPA 90)은 사전예방조치로서 이중선체 구조의 단계적 의무화를 제정하였다. 유류오염법을 제정하기 위해 구성된 위원회는 엑슨·발데즈 사건에 따른 사회 각계의 의견과 국제사회의 동향을 검토하고 이중선체도입을 위해 이중선체제도 도입에 따른 경제적인 파급효과에 대한 영향을 분석한 후 이중선체 구조의 선박이 유류오염의 방지에 가져오는 효과가 이중선체도입에 따른 산업계에 가져오는 비용보다 크다고 판단하였다. 이중선체 요건은 1990년 6월 30일 이후에 발주되거나 1994년 1월 1일 이후 인도된 5,000톤급 이상의 모든 유조선에 대해 이중선체(Double-Hull) 구조를 의무화하고 있다.⁵⁾ 선박건조 계약이 1990년 6월 30일 이전에 체결되어 1994년 1월 1일 이전까지 인도되지 않은 5,000톤 이상의 모든 신조선은 이중선체를 갖춰야 하고 5,000톤 미만의 신조선인 경우라도 이중선체에 상응하는 이중 격납 시스템(Double Containment System)을 갖추 수도 있다.⁶⁾ 이와 동시에 2015년까지 기존 단일 선체 유조선에 대한 단계적 해체를 규정하였다. 미국 유류오염법(OPA 90)에 의한 단일선체 유조선 퇴출일정은 다음 <표 4-2>과 같으며, 2015년 1월 1일 이후에 단일 선체 구조의 유조선은 미국 이외의 지역에서만 운항할 수 있다.



5) 46. U.S.C. § § 3703a(c)(3).

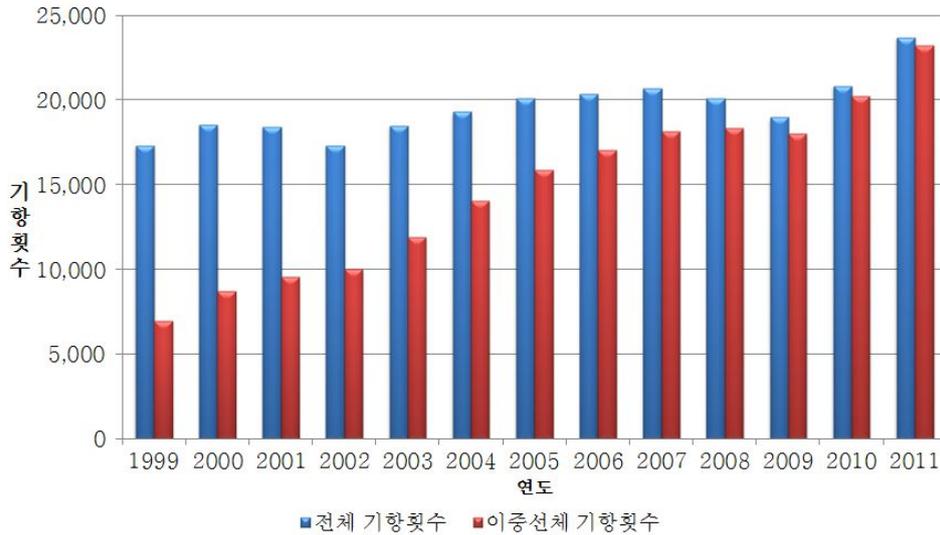
6) 46. U.S.C. § § 3703a(c)(2).

<표 4-2> 유류오염법(OPA 90)의 단일선체 유조선 퇴출일정

퇴출 연도	단일선체			단일선체(이중 바닥 또는 선측)		
	5,000~ 15,000GT	15,000~ 30,000GT	30,000GT or More	5,000~ 15,000GT	15,000~ 30,000GT	30,000GT or More
1995	1955년 이전	1955년 이전	1967년 이전	1950년 이전	1950년 이전	1962년 이전
1996	1956-1957	1956-1958	1968-1969	1951-1952	1951-1953	1963-1964
1997	1958-1959	1959-1961	1970-1971	1953-1954	1954-1956	1965-1966
1998	1960-1961	1962-1964	1972-1973	1955-1956	1957-1959	1967-1968
1999	1962-1963	1965-1967	1974-1975	1957-1958	1960-1962	1969-1970
2000	1964-1965	1968-1970	1976-1977	1959-1960	1963-1965	1971-1972
2001	1966	1971-1972	1978	1961	1966-1967	1973
2002	1967	1973-1974	1979	1962	1968-1969	1974
2003	1968	1975-1976	1980	1963	1970-1971	1975
2004	1969	1977-1978	1981	1964	1972-1973	1976
2005	1970-1980	1979-1980	1982	1965-1975	1974-1975	1977
2006	1981	1981	1983	1976	1976	1978
2007	1982	1982	1984	1977	1977	1979
2008	1983	1983	1985	1978	1978	1980
2009	1984	1984	1986	1979	1979	1981
2010	1984년 이후	1984년 이후	1986년 이후	1980	1980	1982
2011				1981	1981	1983
2012				1982	1982	1984
2013				1983	1983	1985
2014				1984	1984	1986
2015				1984년 이후	1984년 이후	1986년 이후

자료 : 46. U.S.C. § § 3703a(c) (3)

1999년부터 2011년까지 미국항구의 전체 유조선 및 이중선체 기항횟수를 통해 이중선체 구조 의무화의 진행상황을 살펴보면 다음 <그림 4-2>와 같다. 1999년에는 전체 기항횟수 대비 이중선체 기항횟수가 약 40%였지만 2011년에는 약 98%임을 확인할 수 있다. 위의 <표 4-1>에서 확인하였듯이 2015년 1월 1일 이후 미국항구에는 이중선체 유조선만이 운항할 수 있다.



<그림 4-2> 미국항구의 전체 및 이중선체 기항횟수

자료 : U.S. Department of transportation, Maritime Administration, 2011

1991년 국제해사기구(IMO) 산하 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC)의 제31차 해양환경보호위원회 회의와 1992년 제32차 MEPC 회의를 통하여 미국의 이중선체 구조방식 의무를 국제 규칙화하였다. 그 후 2003년 12월 런던에서 선박해양오염방지협약 개정안을 최종 확정하였다. 국제해사기구(IMO)의 단일선체 유조선 퇴출일정 및 단일선체 유조선의 카테고리 구분은 다음 <표 4-3>, <표 4-4>과 같다.

국제해사기구(IMO)는 카테고리 1에 해당하는 단일선체 유조선 중 1982년 4월 4일 이전에 인도된 선박에 대해서는 2005년 4월 5일까지, 1982년 4월 4일 이후에 인도된 선박에 대해서는 2005년에 퇴출하도록 정하였다. 카테고리 2 및 3에 해당하는 단일선체 유조선은 2005년 4월 5일부터 2010년까지 단계적으로 퇴출하도록 정하였다. 예외적으로 주관청은 상태평가제도(CAS)에 대해 만족스러운 결과를 받은 카테고리 2와 3의 유조선에 2015년까지 또는 선령이 25년에 도달할 때까지 운항기간을 연장할 수 있다.

<표 4-3> 국제해사기구(IMO)의 단일선체 유조선 퇴출일정

퇴출연도	카테고리 1	카테고리 2 및 3
2005년 4월 5일	1982년 4월 4일 이전	1977년 4월 4일 이전
2005년	1982년 4월 4일 이후	1977년 4월 4일 이후 ~1978년 1월1일 이전
2006년		1978년 및 1979년
2007년		1980년 및 1981년
2008년		1982년
2009년		1983년
2010년		1984년 이후

자료 : 선박해양오염방지협약 부속서 I 규칙 13g(3)

<표 4-4> 국제해사기구(IMO)의 단일선체 유조선 카테고리 구분

유형	선박의 형태
카테고리1	MARPOL 협약 부속서 I의 제1(26)규칙에 정의된 신조선에 대한 요건을 만족하지 않는 선박으로, 화물로서 원유, 연료유, 증요 또는 원할유를 운송하는 2만 DWT 이상의 유조선 및 상기 이외의 기름을 운송하는 3만 DWT 이상의 유조선
카테고리2	MARPOL 협약 부속서 I의 제1(26)규칙에 정의된 신조선에 대한 요건을 만족하는 선박으로, 화물로서 원유, 연료유, 증요 또는 원할유를 운송하는 2만 DWT 이상의 유조선 및 상기 이외의 기름을 운송하는 3만 DWT 이상의 유조선
카테고리3	5,000 DWT 이상의 선박으로 카테고리 1 및 2에 명시된 재화중량톤 미만의 단일선체 유조선

주 : 카테고리 1에 해당되는 유조선은 대부분 1982년 이전에 건조된 선박으로 분리벨러스트 탱크(SBT)와 보호적 배치(PL) 규정을 적용하지 않는 선박이며, 카테고리 2 선박은 1996년 이전에 건조된 선박으로 SBT와 PL 규칙을 만족하는 선박임
 자료 : 선박해양오염방지협약 부속서 I 규칙 13g(3)

유럽연합은 2002년 11월 13일 스페인 서북부 가르시아 연안에서 단일선체 유조선 프레스티지(Prestige)호 침몰로 6만 3,000톤의 기름이 해양으로 유출되어 20억 유로가 넘는 피해가 발생하자, 2003년 7월 입법 예고한 단일선체 유조선의 운항규제를 같은 해 10월부터 착수하였다. 유럽연합 규제조치의 핵심은 단일선체 유조선의 조기퇴출과 중질유의 운송금지이다. 즉, 일정한 선령에 도달한 선박에 대해서는 기존의 계획과 관계없이 조기에 퇴역시키고, 환경적으로 위대한 중질유는 이중선체 유조선에 의해서만 운송하도록 하는 것이 EU 규제정책의 핵심이다. 유럽연합의 단일선체 유조선의 카테고리 구분은 국제해사기구(IMO)와 동일하며, 유럽연합의 단일선체 유조선 퇴출규정은 다음 <표 4-5>와 같다.

<표 4-5> 유럽연합의 단일선체 유조선 퇴출 규정

퇴출연도	카테고리 1	카테고리 2 및 3
2003년	1980년 이전	1975년 이전
2004년	1981년	1976년
2005년	1982년 이후	1977년
2006년		1978년 및 1979년
2007년		1980년 및 1981년
2008년		1982년
2009년		1983년
2010년		1984년 이후

주 : 다만 이 같은 규정에도 불구하고, 유류운송에 사용하지 아니하고 화물탱크 전 길이에 걸쳐 이중저 또는 이중 측면을 가지고 있거나, 유류를 운송하지 아니하고 화물탱크 전 길이에 걸쳐 이중구역을 가지고 있으나 선박해양오염방지협약(MARPOL 73/78) 부속서 I 개정 13G 규칙 1(c)항의 면제 조건을 충족하지 아니하는 카테고리 2 및 3의 유조선의 경우, 2015년의 선박 인도일 또는 인도한 날로부터 25년이 도달한 날짜 가운데, 빨리 도래한 날짜까지 운항할 수 있음.

자료 : Regulation (EC) No 1726/2003 of the European Parliament and of the Council of 22 July 2003 amending Regulation (EC) No 417/2002 on the Accelerated Phasing-in of Double-hull or Equivalent Design Requirement for Single-hull Oil Tankers

V. 실증 분석

1. Chow 단절점 검증

1) 분석모형

Chow 단절점 검증은 1960년 Gregory C. Chow에 의해서 도입된 검증방법으로, 특정시점을 기준으로 분석하고자 하는 모형에 대하여 통계적으로 유의한 구조적 변화를 관측하는 통계처리 기법이다. 대부분 단절점(breakpoint)은 경제, 산업 또는 기업에서 역사적으로 중요한 어떤 사건에 의해 식별된다.

$t = 1, \dots, T$ 에 걸친 시계열 자료가 주어져 있을 때, 어떤 회귀모형의 모수 값에 대한 구조적 변동이 $t_1 + 1$ 시점에 발생하였다고 가정하면, 전체 표본을 $t = 1, \dots, t_1$ 까지의 하위표본과 $t = t_1 + 1, \dots, T$ 까지의 하위표본으로 구분할 수 있다. 만약 구조적 변동이 중요하다면 두 개의 하위표본은 서로 다른 회귀모형을 가지게 될 것이고 다음과 같이 두 개의 모형을 통해 추정하여야 한다.

$$t = 1, \dots, t_1 \text{에 대해 } y_t = \beta_0^{(1)} + \beta_1^{(1)} x_{1,t} + \beta_2^{(1)} x_{2,t} + \varepsilon_t \quad (\text{식 5.1})$$

$$t = t_1 + 1, \dots, T \text{에 대해 } y_t = \beta_0^{(2)} + \beta_1^{(2)} x_{1,t} + \beta_2^{(2)} x_{2,t} + \varepsilon_t \quad (\text{식 5.2})$$

하지만 구조적 변동이 중요하지 않고 두 하위표본의 회귀모형이 동일하다면, 다음과 같이 단 하나의 모형을 통해 추정하여야 한다.

$$t = 1, \dots, T \text{에 대해 } y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{1,t} + \beta_2 x_{2,t} + \varepsilon_t \quad (\text{식 5.3})$$

(식 5.3)의 모형은 $\beta_0^{(1)} = \beta_0^{(2)} = \beta_0$ 및 $\beta_1^{(1)} = \beta_1^{(2)} = \beta_1$ 의 제약이 주어진 모형이므로 제약모형(restricted model)으로 간주한다. 반면 (식 5.1), (식 5.2)는

모수에 아무런 제약이 가해지지 않은 것이기 때문에 무제약 모형으로 간주한다.

시계열 자료의 구조적 안정성을 검증하기 위하여 제약모형의 잔차제곱합계(= SSR_R)와 두 무제약모형의 잔차제곱합계의 합(= $SSR_U^{(1)} + SSR_U^{(2)}$)을 비교하여 분석한다. 이때 사용하는 검증통계량은 다음 식과 같다.

$$F = \frac{[SSR_R - (SSR_U^{(1)} + SSR_U^{(2)})]/(K+1)}{(SSR_U^{(1)} + SSR_U^{(2)})/(T-2K-2)} \quad (\text{식 5.4})$$

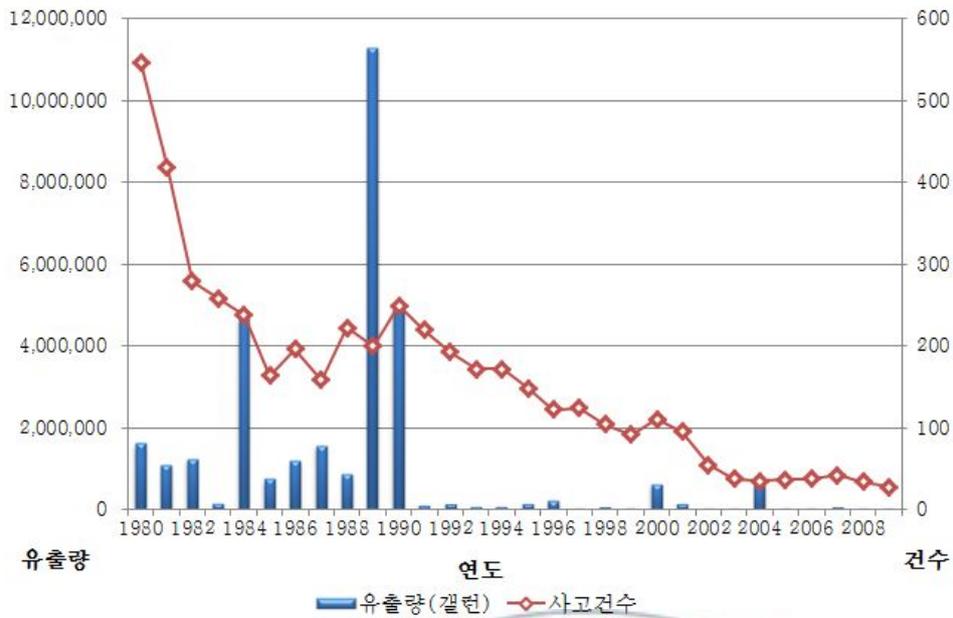
단, K는 절편항을 제외한 독립변수의 수

만일 뚜렷한 구조적 변화가 없고 제약조건이 타당하다면, 무제약 모형인 (식 5.1), (식 5.2)의 SSR 의 합계는 제약모형인 (식 5.3)의 SSR 과 거의 같아야 한다. 반대로 단절점이 중요한 것이라면 무제약모형은 주어진 자료를 제약모형보다 잘 설명할 것이고 두 무제약 모형의 SSR_U 의 합계는 제약모형의 SSR_R 보다 작을 것이다.

2) 실증모형 설정 및 추정결과

연구에서는 미국의 유류오염법(OPA 90) 발효에 따른 이중선체 의무화로 인하여 해양유류유출량의 구조적 변동(structural change)이 존재하는지의 여부를 확인하기 위하여 1980년부터 2009년까지의 기간에 대해 Chow 단절점 검증(Chow breakpoint test)을 수행하였다.

본 연구에서는 $t = 1980, \dots, 2009$ 에 걸친 미국 해양 유류유출량 시계열자료에 대해 중요한 충격을 주는 시점(사건)을 OPA 90이 발효 후인 1991년으로 가정하였고, 전체 표본기간을 하나는 OPA 90 발효 이전 기간인 $t_1 = 1980, \dots, 1990$ 로, 다른 하위표본은 OPA 90 발효 이후 기간인 $t_2 = 1991, \dots, 2009$ 의 기간으로 구분하였다. Chow 단절점 검증을 위하여 1980년부터 2009년까지 미국에서 발생한 유조선 해양유류유출사고 건수(NUMBER)와 해양유류유출량(VOLUME)의 자료를 사용하여 시계열 회귀분석을 실시하였다.



<그림 5-1> 미국에서 발생한 유조선 유류유출량과 사고건수(1980년-2009년)
 자료 : USCG, Polluting Incidents In and Around U.S. Waters, 2011

전체기간인 1980년부터 2009년까지 미국에서 발생한 유조선 해양유류유출사고 건수와 유출량에 대한 그래프는 <그림 5-1>과 같다. 위의 그래프를 살펴보면 미국에서 발생한 유조선 해양유류유출량이 등락을 반복하다 1991년을 기점으로 크게 감소한다. 그리고 미국에서 발생한 유조선 해양유류유출사고건수는 지속적으로 감소하는 추세이다.

OPA 90이 발효되기 이전 기간인 t_1 과 발효 이후 기간인 t_2 에 대한 각각 시계열 자료들의 기초통계량은 다음 <표 5-1>, <표 5-2>와 같다. 해양유류유출량의 경우 OPA 90 발효 이전기간에는 평균 2백만 658천 갤런에서 OPA 90 발효 이후기간에는 평균 117천 갤런으로 OPA 90 발효이후 해양유류유출량이 약 22배정도 유출량이 감소하였다. 해양유류유출 사고건수의 경우 OPA 90 발효 이전기간에는 평균 266건에서 OPA 90 발효 이후 98건으로 약 2.7배 감소하였다.

<표 5-1> OPA 90 발효 이전기간에 대한 시계열 자료 기초통계량

구분	평균	중앙값	최대값	최소값	표준편차	왜도	첨도
NUMBER	266	238	547	158	117	1.48	4.13
VOLUME	2,658,917	1,219,922	11,272,320	145,822	3,256,563	1.88	5.51

주1) NUMBER : 1980년부터 1990년까지 미국에서 발생한 유조선 해양유류유출사고건수

주2) VOLUME : 1980년부터 1990년까지 미국에서 발생한 유조선 해양유류유출량

<표 5-2> OPA 90 발효 이후기간에 대한 시계열 자료 기초통계량

구분	평균	중앙값	최대값	최소값	표준편차	왜도	첨도
NUMBER	98	95	220	28	61	0.47	1.99
VOLUME	117,429	56,673	636,834	1,337	187,286	2.15	6.30

주1) NUMBER : 1991년부터 2009년까지 미국에서 발생한 유조선 해양유류유출사고건수

주2) VOLUME : 1991년부터 2009년까지 미국에서 발생한 유조선 해양유류유출량

두 시계열 자료의 안정성을 확인하기 위하여 단위근 검증을 실시하였다. 분석할 시계열 자료가 불안정할 경우 그 자료를 사용한 분석결과는 허구적 회귀현상이 발생할 수 있으므로 시계열 회귀분석의 경우 단위근 검증은 매우 중요하다. 본 연구에서 단위근 검증방법은 Augmented Dickey-Fuller(ADF) 검증과 Phillips-Perron(PP) 검증의 두 가지 방법을 사용하였다. 시계열 자료에 대한 단위근 분석결과는 다음 <표 5-3>과 같다.

<표 5-3> 시계열 자료에 대한 단위근 분석결과

구분	ADF 검증	PP 검증
NUMBER	-4.967*** (0.0000)	-4.247*** (0.0025)
VOLUME	-3.410*** (0.0014)	-3.394*** (0.0014)

단위근 검증 결과, 유출사고 건수(NUMBER)의 검증결과는 ADF 검증에서 -4.967으로 1%의 유의수준에서 기각되어 단위근이 존재하지 않는 것으로 나타났다

으며, PP 검증에서도 -4.247으로 1%의 유의수준에서 기각되어 단위근이 존재하지 않는 안정적인 시계열로 나타났다. 유출량(VOLUME)의 검증결과는 ADF 검증에서 -3.410으로 1%의 유의수준에서 기각되어 단위근이 존재하지 않는 것으로 나타났고, PP 검증에서도 -3.394로 1%의 유의수준에서 기각되어 안정적인 시계열로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 안정적인 자료인 유출사고 건수(NUMBER)와 유출량(VOLUME)의 자료를 사용하여 Chow 단절점 검증을 사용하여 분석하였다. 만일 OPA 90의 발효가 중요한 사건이고 OPA 90 발효 이전기간과 OPA 90 발효 이후기간의 모수 값이 달라진다면, 두 개의 하위표본은 다음과 같이 서로 다른 회귀모형을 갖게 될 것이다.

$$t_1 = 1980, \dots, 1990 \text{에 대해 } VOLUME_{t_1} = \beta_0^{(1)} + \beta_1^{(1)} NUMBER_{t_1} + \varepsilon_{t_1} \quad (\text{식 5.5})$$

$$t_2 = 1991, \dots, 2009 \text{에 대해 } VOLUME_{t_2} = \beta_0^{(2)} + \beta_1^{(2)} NUMBER_{t_2} + \varepsilon_{t_2} \quad (\text{식 5.6})$$

그러나 OPA 90 발효라는 사건이 중요하지 않고 두 하위표본에 대해 모수의 진정한 값이 동일하다면, 다음과 같은 하나의 모형을 갖게 될 것이다.

$$t = 1980, \dots, 2009 \text{에 대해 } VOLUME_t = \beta_0 + \beta_1 NUMBER_t + \varepsilon_t \quad (\text{식 5.7})$$

시계열 자료의 구조적 안정성을 검증하기 위한 검증통계량은 다음 (식 5.8)과 같다.

$$F = \frac{[SSR_R - (SSR_U^{(1)} + SSR_U^{(2)})]/2}{(SSR_U^{(1)} + SSR_U^{(2)})/26} \quad (\text{식 5.8})$$

만일 뚜렷한 구조적 변화가 없고 제약조건이 타당하다면, 무제약 모형인 (식 5.1), (식 5.2)의 SSR 의 합계는 제약모형인 (식 5.3)의 SSR 과 거의 같아야 한다. 반대로 단절점이 중요한 것이라면 무제약모형은 주어진 자료를 제약모형보다 잘 설명할 것이고 두 무제약 모형의 SSR_U 의 합계는 제약모형의 SSR_R 보다 작을 것이다.

3) 실증모형 추정결과

미국의 OPA 90 발효에 따른 이중선체 의무화로 인하여 해양유류유출량의 구조적 변동(structural change)이 존재하는지의 여부를 확인하기 위하여 1980년부터 2009년까지의 기간에 대해 Chow 단절점 검증(Chow breakpoint test)을 수행하였다. 분석기간은 1989년부터 2009년까지이며, 미국 해양 유류유출량 시계열자료에 대해 중요한 충격을 주는 시점(사건)을 OPA 90이 발효 후인 1991년으로 가정하였다. Chow 단절점 검증결과는 <표 5-4>와 같다.

<표 5-4> Chow 단절점 검증결과

귀무가설	검정방법		
	F-Statistic	Log Likelihood Ratio	Wald Static
No Breaks At Specified Breakpoints	4.4892** (0.0211)	8.8990** (0.0117)	8.8978** (0.0112)

Chow 단절점 검정 결과, Chow 단절점 검증통계량 F값이 4.4892로 5% 유의수준에서 단절점이 존재하지 않는다는 귀무가설이 기각되었다. 따라서 전체 분석기간인 1980년에서 2009년까지의 기간 동안 미국 유류오염법(OPA 90) 발효 후인 1991년이 해양유류유출사고에 대한 해양유류유출량의 회귀모형에 대하여 단절점을 의미하는 것으로 분석되었다.

2. 비용-편익분석

1) 분석모형

비용-편익분석을 위한 분석모형에는 순현재가치법(Net Present Value, NPV)과 내부수익률법(Internal rate of return, IRR), 편익비용 비율(Benefit/Cost Ratio, BCR)법이 있다. 순현재가치법이 개념적으로 최선의 기법이지만 대부분의 분석에서 여러 기법을 함께 사용하는 이유는 투자결정이 미래의 불확실성 하에서 이루어지기 때문이다.

순현재가치법(NPV)은 기대되는 미래 현금 흐름의 현재가치(Discounted net cash flow)로, 투자로부터 생기는 미래소득의 현재가치에서 투자비용을 빼서 구한다. 순현재가치법을 구하는 식은 다음과 같으며, B는 편익, C는 비용, r은 과거와 미래의 가격을 현재가치로 전환하는 할인율이다.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(B-C)_t}{(1+r)^t} - I_0 = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+r)^t} - I_0$$

$t = 0, 1, \dots, n$

순현재가치법으로 대안을 평가하는 기준은 NPV의 값이 양(NPV>0)이면 그 투자안을 채택하여야 하고, NPV의 값이 음(NPV<0)이면 그 투자안을 기각하여야 한다. NPV가 정확히 0이라면 그 투자안을 채택하거나 하지않거나 무차별하다. 그 이유는 그 사업의 수행으로 단지 초기 투자와 이자 지불의 상황만 가능하게 되기 때문이다. 순현재가치법의 장점은 시간가치를 반영하고 대안 선택 시 명확한 기준을 제시한다는 것이고, 단점은 대안의 우선순위 결정 시 오류 가능성이 있는 것이다.

내부수익률(IRR)은 어떤 투자안의 미래 발생할 현금흐름 NPV를 '0'이 되게 하는 할인율이다. 따라서 어떤 투자안의 IRR이 요구수익률을 능가(IRR>요구수익률)한다면 그 투자안은 채택되어야 하고, IRR이 요구수익률보다 작다면(IRR<요구수익률) 그 투자안은 기각되어야 한다.

$$\sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+IRR)^t} - I_0 = 0$$

IRR의 장점은 NPV와 관계가 밀접하고 대개 동일한 의사결정을 가져오며, 이해하기 쉽고 의사소통이 편리하다는 점이고, 단점은 비정상적인 현금흐름의 경우 복수의 값이 존재할 가능성이 있고, 상호 배타적인 투자안의 비교 시 의사결정이 잘못될 가능성이 있다는 것이다.

편익비용 비율은 미래 현금유입액(편익)의 현재가치를 미래 현금 유출액(비용)으로 나누어 그 비율이 1이상이면 사업을 시행하고 반대로 1보다 작으면 사업을 시행하지 않는다.

$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{TR_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{TC_t}{(1+r)^t} + I_0}$$

BCR의 장점은 이해가 용이하며, 편익-비용의 발생시간을 고려한다는 것이고, 단점은 각 사업의 후생효과의 규모(scale)가 서로 다른 측면을 고려하지 못하기 때문에 편익과 비용의 규모에 따라 BCR이 매우 민감하고, 내부수익률과 마찬가지로 상호배타적인 투자안 비교 시 의사결정을 잘못할 가능성이 있다는 것이다.

2) 실증모형 설정 및 추정

비용-편익분석을 실시하기 위하여 앞서 살펴본 세 가지의 분석방법을 통해 실증모형을 설정하였다. 분석기간은 1998년부터 2009년까지 12년에 대해 분석하였고, 할인율은 미국 예산관리국(Office of Management and Budget)의 편익비용분석 할인율인 7%를 채택한다. 편익으로는 단일선체에서 이중선체로 유조선의 구조가 변화함에 따른 감소된 해양유류유출사고에 대한 편익을 설정하며, 비용으로는 단일선체에서 이중선체 구조로 변화함에 따른 추가 건조비 및 운영비를 설정한다. 자료수집의 한계로 인해 분석기간은 12년(1998년~2009년)으로 한정한다.

연간 데이터는 다음 <표 5-6>과 같다. 해당기간동안 미국에서 발생한 유조선 사고건수는 연평균 59건이었으며 미국항구에 기항하는 유조선의 기항횟수의 연평균은 18,873건이었고, 이에 따른 미국에서 발생한 유조선 사고발생비율의 연평균은 0.32%로 추정된다.⁷⁾

<표 5-6> 미국에서 발생한 유조선 사고발생비율

연도	유조선 사고건수	유조선 기항횟수	사고발생비율
1998	104	16,841	0.62%
1999	92	17,279	0.53%
2000	111	18,535	0.60%
2001	95	18,387	0.52%
2002	55	17,320	0.32%
2003	38	18,503	0.21%
2004	35	19,316	0.18%
2005	37	20,118	0.18%
2006	38	20,391	0.19%
2007	42	20,699	0.20%
2008	34	20,096	0.17%
2009	28	18,991	0.15%
평균	59	18,873	0.32%

자료 : 미국 연방교통부 해상청(Department of Transportation Maritime Administration)의 해양통계자료

다음으로 총톤수 대비 유출비율을 구하기 위하여 1990년부터 2009년까지 국제유류오염보상기금(IOPCF, International Oil Pollution Compensation Fund)에 의해 수집된 사고 통계를 분석하였다. 미국에서 발생한 해양유류유출사고 중 유출량이 가장 많았던 사고에 대한 사례를 살펴보면 다음 <표 5-7>과 같다.

7) 유조선 사고발생비율을 계산할 때 단일선체 유조선의 사고건수와 단일선체 유조선의 기항횟수를 이용하여야 하지만 단일선체와 이중선체 유조선에 대한 자료를 구분하여 수집하기 어려운 현실적인 문제가 있기 때문에 단일선체 및 이중선체가 모두 포함된 복합자료를 사용하였다. 따라서 사고발생비율이 과소평가될 가능성이 있다.

<표 5-7> 미국에서 발생한 대형 유류유출사고 사례

선박	사고날짜	사고장소	총톤수 (GT)	유출량 (톤)	사고원인	정화 및 예방조치비용
T/V POSAVINA	00.06.08.	USA Coastal	27,533	192	충돌	\$58,835
M/T NEW AMITY	01.09.22	USA Coastal	56,311	162	선박충돌	\$110,645
F/V WINDY BAY	01.08.06	USA Coastal	405	114	좌초	\$3,396,397
T/B PINEY POINT	05.11.28	USA Coastal	1,675	102	좌초	\$21,175
ARSCO III	06.02.05	USA Coastal	101	41	침몰	\$98,454

미국에서 발생한 해양유류유출사고 357건 중 총톤수(GT)⁸⁾가 명시되어있는 사고 163건에 대하여 총톤수 대비 유출비율에 대해서 분석하였다. 그 결과 미국의 유류유출 사고 시 총톤수 대비 평균 유출비율은 약 2.6%였다. 하지만 이 결과값은 단일선체와 이중선체의 사고에 대한 구분이 되어 있지 않기 때문에 단일선체 유출사고에 대한 유출량이 과소평가되었다는 한계가 있다.

위의 <그림 5-1>을 통해 확인하였듯이 미국에서 발생한 유조선 유류유출량과 사고건수는 유조선 이중선체 구조 의무화를 규정한 미국 유류오염법(OPA 90)이 발효된 1990년을 기점으로 크게 감소하고 있다. 하지만 미국 유류오염법(OPA 90)에는 이중선체 구조 의무화뿐만 아니라 해양유류유출량 및 사고건수를 감소하기 위한 유출원인에 대한 규제 및 방지, 이중선체를 제외한 현존 유조선에 대해 긴급 라이더링 장비와 사전통보 요구조건, 이중선체를 제외한 현존 유조선으로부터 유류유출의 감소시키기 위한 운영상의 조치 등 다양한 조항이 포함되어 있기 때문에 1990년을 기점으로 감소한 유조선 해양유류유출량 전체가 이중선체 구조 의무화로 인한 효과라고 할 수 없다.

따라서 본 연구는 미국의 단일선체 유조선의 퇴출을 이중선체 유조선의 도입으로 가정하고, 미국에서 실제로 퇴출된 단일선체 유조선의 크기별 척수 및 적재중량톤(DWT)에 대한 연간 자료를 기준으로 편익 및 비용을 산출하였다. 미국

8) GT(Gross Tonnage) : 총톤수. 선박의 총톤수 측정에 관한 법류에서 규정된 선박의 밀폐구획의 용적톤수.

유류오염법(OPA 90)하의 이중선체 유조선 설계에 대한 규정은 다음 <표 5-8>과 같이 4가지 크기에 따라 이중선체 유조선을 분류한다. 4가지 크기에 대한 이중선체 유조선의 설계 규정을 통해 이중선체 유조선 설계는 선측과 바닥에 대하여 통상 2미터의 간격을 규정하고 있음을 알 수 있다.

<표 5-8> 크기에 따른 이중선체 유조선 분류

종류	톤수	선측 간격 (meters)	바닥 간격 (meters)	실제 선측 간격범위	실제 바닥 간격범위
Product	40k DWT급	2.0	2.0	2.0-2.42	2.0-2.18
Aframax	80k DWT급	2.0	2.0	2.0-2.28	2.0-.63
Suezmax	135k DWT급	2.0	2.0	2.05-2.7	2.58-2.8
VLCC	250k DWT급	2.0	2.0	2.4-3.6	3.0-3.2

자료 : National Research Council, Environmental performance of tanker designs in collision and grounding, 2001.

미국 유류오염법(OPA 90)의 단일선체의 단계적 퇴출에 관한 조항에 따라 미국에서 실제로 퇴출된 단일선체 유조선을 유조선의 크기와 적재중량톤(DWT)에 따라 연도별로 나타내면 다음 <표 5-9>과 같다. 1994년부터 2009년까지 퇴출된 단일선체 유조선 척수는 100척이며 적재중량톤(DWT)은 7,106,3281DWT이다.



<표 5-9> 미국에서 퇴출된 단일선체 유조선 척수 및 적재중량톤(DWT)

연도	Product Tanker (40k DWT)		Aframax Tanker (80k DWT)		Suezmax Tanker (135k DWT)		VLCC Tanker (250k DWT)	
	척수	DWT	척수	DWT	척수	DWT	척수	DWT
1994	2	66,764	3	255,075				
1995	6	236,251	2	164,194	2	277,405	2	330,146
1996	7	241,034	2	146,109				
1997	4	37,938	3	217,765	1	122,249		
1998	4	143,037	1	78,093	3	364,924		
1999	4	41,465						
2000	4	133,452	3	211,827			2	533,180
2001	1	39,973	2	141,555			1	176,405
2002	5	195,324					1	176,405
2003	6	225,489			1	122,759		
2004	3	114,953	1	91,393	1	138,698		
2005			4	366,467			1	214,855
2006	3	112,215					2	379,221
2007	4	177,181					2	382,944
2008	4	154,892						
2009	2	79,838					1	214,853
합계	59	1,999,806	21	1,672,478	8	1,026,035	12	2,408,009

자료 : 미국 연방교통부 해사청 (Department of Transportation Maritime Administration)의 해양통계자료

단일선체 대비 이중선체 구조 의무화로 인한 유류유출 감소율은 2001년부터 2008년까지 미국 해안경비대에 의해 조사된 개별 선박오염사고의 실증자료에 대해 토빗 회귀분석(tobit regression)을 실시한 Yip et al.(2011)의 연구결과 값을 사용하였다. 선박사고로 인한 유류 유출량이 사고발생시간(연도), 선박 사고 종류(선박충돌, 폭발, 화재, 좌초, 범람, 장비결함, 침몰), 선박의 특징(크기, 연령, 국기, 추진력), 사고 시간의 가시성(낮, 밤), 선박운영단계(표류 유무), 선박 선체설계(이중선체, 단일선체)의 변수에 영향을 받는다고 모형을 설정한 후 토빗 회귀분석을 실시하였고, 그 결과 유조선 선박 사고에 대해서 평균적으로 유

류 유출량의 62%, 유조선 바지선 사고에 대해서는 평균적으로 유류유출량의 20%가 감소한다는 것을 확인하였다. 유류가격은 국제 유가 기준인 미국 서부 텍사스 중질유(WTI, West Texas Intermediate)의 유류 가격을 사용하였다.

이중선체 구조 의무화로 인한 두 번째 편익은 해양유류유출 발생 예방으로 인한 정화 및 예방조치 비용 절감 편익이다. 이는 예방된 유류유출량에 대한 정화 및 예방조치 비용을 산출함으로써 편익을 추정할 수 있다. 세 번째 편익은 어업 및 관광 손실비용, 환경적 및 기타 피해비용 예방편익이 있다. 정화 및 예방조치 비용 절감 편익과 마찬가지로 예방된 유류유출량에 대해 비용을 산출함으로써 편익을 추정할 수 있다.

앞서 3장에서 살펴본 세계 및 미국 해양유류유출 현황분석에서 해양유류유출 사고는 소수의 유조선 사고로 인해 대량의 해양유류유출이 발생한다는 것을 알 수 있었다. 이중선체로 인해 대형 유출사고를 예방함으로써 그로 인해 발생하는 어업 및 관광손실비용, 환경적 및 기타 피해비용을 예방할 수 있다.

Vanem et al.(2007a,b)은 Jean-Hansen(2003), McCay et al.(2004), Etkin(2004)의 연구를 고려하여 사회경제적 및 환경적 비용은 정화비용의 1.5 배임을 분석하였다. 따라서 유류유출에 대한 총비용은 정화비용의 2.5배이다. 국제유류오염보상기금(IOPCF)의 미국에 대한 유류오염사고 비용 추정기준은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{총비용(TC)} &= \text{정화 및 예방조치 비용(CC, clean-up and preventive} \\ &\quad \text{measures)} + \text{어업관련비용} + \text{관광관련비용} + \text{환경적피해비용} + \\ &\quad \text{기타피해비용} \\ &= \text{정화 및 예방조치 비용(CC)} \times 2.5 \end{aligned}$$

본 연구에서는 정화 및 예방조치 비용을 포함한 총비용을 단일선체 대비 이중선체 유조선 구조에 따른 예방된 유류유출량에 톤당 총비용 가격을 곱하여 산출하였다. 한편 국제해사기구(IMO)의 환경적 위험 평가기준에 대한 논의 및 유류오염 방지를 위한 규정의 편익을 평가하기 위하여 유류유출에 대한 총비용 공식에 대해 다양한 연구가 이루어져 왔다.

이중선체 구조 의무화의 경제적 타당성 분석을 위해서 가장 중요한 편익은 유류유출사고에 대한 사회경제적 및 환경적 비용이기 때문에 유류유출사고에 대한

적절한 비용을 산출하는 것이 가장 중요하다. 정화비용 및 사회경제적, 환경적 비용이 모두 포함된 총비용 공식에 관한 국제해사기구(IMO)의 공식안전평가(FSA) 기준 및 연구에는 다음 <표 5-10>에 나타난 세 가지가 있다.

<표 5-10> 총비용 공식의 비교

연구	총비용 = f (유출량)
FSA Criteria	총비용 = 54,000 · V
Kontovas et al. (2010)	총비용 = 33,425 · V
Skjong et al. (2005)	총비용 = 40,000 · V

공식안전평가(FSA)는 해양 안전 및 해양 환경의 보호와 관련된 위험을 평가하고 이러한 위험을 감소시키기 위한 국제해사기구(IMO)의 방안에 비용과 편익을 평가하기 위한 합리적이고 체계적인 과정으로 국제해사기구(IMO)에 의해 소개되었다(IMO, 2007). 공식안전평가(FSA) 총비용 산출기준은 유출량 대비 총비용의 평균비율인 톤당 54,000달러이며, 해양오염사고로 발생하는 총비용을 산출하기 위하여 사용하고 있다.

Kontovas et al.(2010)은 국제유류오염보상기금(IOPCF)에 의해 수집된 1976년에서 2006년까지 발생한 유출사고 91건 중 이상치(outlier)를 제외한 83건에 대해서 공식안전평가(FSA)의 연구에 따라 유출량 대비 총비용의 평균비율을 산출하였으며, 그 결과는 톤당 33,425달러였다.

Skjong et al.(2005)은 국제적으로 적용 가능한 유류유출 비용기준을 개발하기 위하여 40개의 지역에 따라 해양유류유출사고 300건 이상에 대하여 유출량 대비 평균 총비용을 연구하였다. 지역별 유조선 운항비율을 가중하여 지역별 유출량 톤당 평균 정화비용은 다음 <표 5-11>과 같다.

<표 5-11> 유류유출에 따른 지역별 톤당 평균정화비용

지역	유출량 톤당 정화비용	지역별 유조선 운항비율
중동	\$1,300	7%
남아메리카	\$3,800	18%
아프리카	\$3,900	18%
오세아니아	\$6,900	2%
유럽	\$13,100	11%
북아메리카	\$24,000	19%
아시아	\$33,300	24%
가중된 국제평균	\$15,900	100%

가중된 국제평균(Weighted global average)는 유출량 톤당 약 15,900달러였으며, 총비용은 국제유류오염보상기금(IOPCF)의 유류오염사고 비용 추정기준을 사용하여 총비용을 산출한 결과 톤당 40,000달러였다. 미국이 포함된 북아메리카의 톤당 정화비율은 24,000달러로서 총비용을 환산하면 60,000달러로 FSA 기준인 54,000달러를 초과한다.

다음으로 현용되고 있는 단일선체를 이중선체 구조로 바뀌질 경우 산출 가능한 비용에는 다음 두 가지가 있다.

첫 번째, 이중선체 건조에 따른 단일선체 대비 추가 건조비용이 있다. 미국연구위원회(NRC)의 보고서에 따르면 단일선체 대비 이중선체 유조선의 경우 건조비용이 9~17% 증가한다.

<표 5-12> 이중선체 유조선의 증가된 건조비용

종류	Size Range (k DWT)	Double Hull (\$/DWT)	Single Hull (\$/DWT)	(\$/DWT)	(%)
Product	10-60	713	649	64	9.0
Aframax	60-100	400	343	57	16.7
Suezmax	100-200	337	288	49	17.0
VLCC	200+	268	233	35	15.0

자료 : NRC, 1998

두 번째, 이중선체 건조에 따른 단일선체 대비 추가 운영비용이 있다. 미국연 구위원회(NRC)의 보고서에 따르면 단일선체 대비 이중선체 유조선의 경우 운영 비용이 5~13% 증가한다.

<표 5-13> 이중선체 유조선의 증가된 운영비용

종류	Single Hull (\$ thousand/year)	Double Hull (\$ thousand/year)	(\$/DWT/year)	(%)
Product	3,035	3,430	9.86	13
Aframax	3,584	4,050	5.18	13
Suezmax	4,212	4,675	3.31	11
VLCC	5,845	6,137	1.04	5

자료 : NRC, 1998

4) 비용-편익분석 결과

비용-편익분석을 위하여 할인율은 앞서 설명한 미국 예산관리국(Office of Management and Budget)의 편익비용분석 할인율인 7%를 적용하였으며, 분석 기간은 1998년부터 2009년까지 12년으로 설정하였다.

이중선체 구조 의무화에 대한 경제적 편익으로는 첫 번째, 유류유출 사고 예방에 따른 유류가치가 있고, 두 번째, 유류유출 정화 및 예방조치 비용 절감 편익을 설정하였다. 마지막으로 어업 및 관광 손실비용, 환경적 및 기타 피해비용 예방편익을 설정하였다. 경제적 비용에는 이중선체 건조에 따른 추가 건조비용 및 추가 운영비용을 설정하였다.

편익 및 비용추정을 위해 1994년부터 2009년까지 12년의 기간동안 실제로 미국에서 퇴출된 Product 유조선, Aframax 유조선, Suezmax 유조선, VLCC 유조선의 4가지 선박크기에 대한 단일선체 유조선 척수 및 적재중량톤(DWT)의 연간 데이터를 사용하였다. 예방된 유류가치 추정을 위한 유류가격에 대해서는 세계 3대 원유 중 하나인 미국 서부 텍사스 중질유(WTI)의 연간 유류가격을 사

용하였다.

다음으로 유류유출에 대한 정화 및 예방조치 비용을 포함한 총비용은 보다 정확한 분석을 위하여 다음 세 가지 총비용 공식에 의해 산출된 총비용 공식을 사용하여 낙관적 시나리오(Optimistic Scenario), 보통 시나리오(intermediate scenario) 그리고 보수적 시나리오(Conservative scenario)의 세 가지 시나리오에 대해 분석을 하였으며 그 시나리오는 다음 <표 5-14>와 같다.

<표 5-14> 시나리오별 비용-편익분석 기준

시나리오	분석방법	총비용 공식
낙관적 시나리오	공식안전평가기준	총비용 = 54,000 · V
보통 시나리오	가중평균	총비용 = 40,000 · V
보수적 시나리오	평균비율	총비용 = 33,425 · V

비용 추정에는 미국연구위원회(NRC)의 4가지 선박크기에 대한 이중선체 유조선의 단일선체 대비 증가된 건조비용 및 운영비용을 사용하여 분석하였다.

시나리오별 비용-편익분석의 결과는 다음 <표 5-15>와 같다. 이중선체 구조 의무화에 대한 비용-편익분석 결과, 국제해사기구(IMO)의 공식안전평가(FRA) 기준을 사용하여 편익의 총비용을 산출한 낙관적 시나리오의 경우 편익은 약 4억 512만 달러로 약 2억 8327만 달러인 비용에 비해 1억 2185만 달러가 많았으며, BCR은 1.43으로 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났다. 연구결과 IRR의 경우 음의 현금흐름과 양의 현금흐름, 그리고 다시 음의 현금흐름이 발생하여 내부수익률의 값이 두 개 이상이 될 가능성이 매우 커지므로 본 연구에서는 IRR을 구하지 않았다. 지역별 유조선 운항비율을 가중 평균한 보통 시나리오의 결과는 BCR이 1.06으로 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났다. 유출량 대비 총비용을 평균한 보수적 시나리오의 경우 BCR이 0.89로 나타나 경제적 타당성이 없는 것으로 나타났다.

<표 5-15> 시나리오별 비용-편익분석 결과

시나리오	구분	추정결과	
		편익	비용
낙관적 시나리오	분류		
	NPV	\$405,122,642	\$ 283,270,158
	BCR	1.43	
보통 시나리오	분류		
	NPV	\$ 300,633,688	\$ 283,270,158
	BCR	1.06	
보수적 시나리오	분류		
	NPV	\$251,561,197	\$ 283,270,158
	BCR	0.89	

Brown and Savage(1996)의 연구와 본 연구에 대한 비용-편익분석 결과를 비교하면 다음 <표 5-16>과 같다. Brown and Savage(1996)는 사전적 경제적 타당성 분석(ex ante economic analysis)으로 1994년부터 2014년까지 20년의 기간에 대해 7%의 할인율을 가지고 분석하였다. 반면 본 연구는 사후적 경제적 타당성 분석(ex post economic analysis)으로 1998년부터 2009년까지 12년의 기간에 대해 실증자료를 통해 분석하였으며, 기존의 연구와 마찬가지로 7%의 할인율을 사용하였다.

Brown and Savage(1996)는 낙관적 시나리오(Favourable Scenario), 보통 시나리오(Most Probable Scenario), 보수적 시나리오(Unfavourable Scenario)의 세 가지 시나리오를 설정하였고, 유출 예방된 유류가치 및 정화비용, 환경적 피해비용, 사회경제적비용 절감 편익에 대하여 논쟁의 여지가 있음에도 불구하고 기존의 분석 자료를 바탕으로 세 가지 시나리오에 대하여 임의로 설정하였다. 본 연구에서는 유류유출 예방 편익의 경우 분석기간에 대한 연간 실증자료를 사용하여 도출하였고, 유류오염 총비용의 경우 공식안전평가기준, 가중평균공식, 평균비율공식의 세 가지 총비용공식에 대해 세 가지 시나리오를 설정하여 분석하였다.

비용의 경우 Brown and Savage(1996)는 1991년 미국연구위원회(NRC)의

보고서에 따라 선박의 크기를 38k DWT급인 소규모, 77k DWT급인 중규모, 234k DWT급인 대규모로 구분하였으며, 이중선체에 따른 추가 건조비 및 추가 운영비 또한 1991년 미국연구위원회(NRC)의 보고서에 따른 결과에 따라 분석하였다. 본 연구에서는 2001년 미국연구위원회(NRC)의 보고서의 선박 크기 기준에 따라 40k DWT급인 Product, 80k DWT급인 Aframax, 135k DWT급인 Suezmax, 250k DWT급인 VLCC로 구분하였으며, 이중선체에 따른 추가 건조비 및 추가 운영비 또한 2001년 미국연구위원회(NRC)의 보고서에서 실제 단일선체와 이중선체의 건조비용 및 운영비용을 비교 분석한 결과에 따라 도출하였다.

선행연구에서 고려된 비용 항목 중 이중선체의 적재 가능한 유류량 감소에 따른 추가 선박 건조비 및 이중선체의 적재 가능한 유류량 감소에 따른 추가 선박 운영비를 본 연구에서 제외하였다. 그 이유는 Brown and Savage(1996)의 연구에서 단일선체에서 이중선체로 구조가 변경되면서 통상 2m의 간격을 두고 발생하는 격벽(cofferdam) 효과로 인해 이중선체에 적재 가능한 톤수가 감소할 것이고 그로 인해 연간 약 20척의 유조선이 추가로 건조해야한다고 가정하였으나, 실제로 이중선체 구조가 의무화된 이후 이중선체의 적재중량톤수(DWT)가 단일선체 유조선에 비해 증가하고 이에 따라 이중선체의 신선박건조비가 증가하였다. 따라서 증가된 신선박건조비를 계산한 상태에서 추가 선박 건조비 및 추가 선박 운영비를 고려한다면 이중계산 될 수 있기 때문에 본 연구에서 제외하였다. 또한 Brown and Savage(1996)의 연구에서 이중선체 구조 의무화로 인한 선박 건조비용의 증가에 따른 자중손실비용(Deadweight loss)의 경우 배럴 당 14¢로 추정하였으나 유가의 경우 석유수출국기구(OPEC)의 석유생산 동향 및 가격정책 및 산유국의 정제시설 증설에 따른 수출여력 변화 등의 영향을 더 많이 받고, 비용을 최소화시키기 위한 신유조선 설계능력이 높아지고 있으므로 그 영향이 크지 않을 것으로 예상하여 제외하였다.

비록 선행연구와 분석방법 및 분석기간, 편익 및 비용의 추정에 있어서 차이점으로 인해 경제적 분석 결과에 대한 결과 값의 차이가 있지만, BCR에 대해서 비교해보면 Brown and Savage(1996)의 경우 가장 가능성이 높은 시나리오에서도 BCR이 0.46으로 편익이 비용의 절반밖에 되지 않았던 것에 반해 본 연구의 분석결과 중 낙관적 시나리오에서 BCR이 1.43으로 이중선체 구조의 의무화가 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났다.

<표 5-16> 경제적 타당성 분석 결과 비교

구분	Brown(1996)의 연구			본 연구		
분석방법	사전적 경제적 타당성 분석			사후적 경제적 타당성 분석		
분석기간	1994년-2014년(20년)			1998년-2009년(12년)		
할인율	7%			7%		
관찰치	739척			100척		
편익 (\$millions/척)	낙관적 시나리오	보통 시나리오	보수적 시나리오	낙관적 시나리오	보통 시나리오	보수적 시나리오
유출 예방된 유류가치	\$0.06m	\$0.05m	\$0.03m	\$0.02m	\$0.02m	\$0.02m
정화비용, 환경적비용, 사회경제적비용 절감편익	\$5.48m	\$2.23m	\$1.37m	\$4.03m	\$2.99m	\$2.49m
총 편익	\$5.54m	\$2.23m	\$1.37m	\$4.05m	\$3.01m	\$2.52m
비용 (\$millions/척)	낙관적 시나리오	보통 시나리오	보수적 시나리오	낙관적 시나리오	보통 시나리오	보수적 시나리오
증가된 선박 건조비용	\$7.09m	\$7.46m	\$7.83m	\$2.68m	\$2.68m	\$2.68m
증가된 선박 운영비용	\$2.70m	\$2.70m	\$2.70m	\$0.15m	\$0.15m	\$0.15m
추가선박 건조비용	\$1.21m	\$1.27m	\$1.33m			
추가선박 운영비용	\$1.09m	\$1.09m	\$1.09m			
자중손실비용	\$0.01m	\$0.01m	\$0.01m			
총 비용	\$12.10m	\$12.53m	\$12.96m	\$2.83m	\$2.83m	\$2.83m
NPV	-\$6.55m	-\$10.30m	-\$11.59m	\$1.21m	\$0.17m	-\$0.31m
BCR	0.46	0.18	0.11	1.43	1.06	0.89

VI. 결론

본 연구는 유조선의 이중선체 구조 의무화 도입이 해양오염감소에 유의한 영향을 주었는지에 대한 Chow 단절점 검증과 경제적 타당성 분석을 하는데 그 목적이 있다.

유조선에 대한 이중선체 구조 의무화 규정이 유류오염법(OPA 90)을 통해 미국에서 처음 법제화된 이후 해양유류유출량 감소에 유의한 영향을 미쳤는지를 분석하기 위하여 Chow 단절점 검증을 시행하였고, 이중선체 구조 의무화에 대한 비용-편익분석을 통해 이중선체 도입에 따른 경제적 타당성을 분석하였다.

미국의 유류오염법(OPA 90)을 통한 이중선체 구조 의무화 도입에 의해 해양 유류유출량의 구조적 변동이 존재하는지의 여부를 확인하기 위하여 1980년부터 2009년까지의 기간에 대해 Chow 단절점 검증을 수행하였다. 두 시계열 자료의 안정성을 확인하기 위하여 ADF 검증과 PP 검증을 실시하였다. 단위근 검증 결과, 유출사고 건수(NUMBER)의 검증결과는 ADF 검증에서 -4.967로 1%의 유의수준에서 기각되어 단위근이 존재하지 않는 것으로 나타났으며, PP 검증에서도 -4.247로 1%의 유의수준에서 기각되어 단위근이 존재하지 않는 안정적인 시계열로 나타났다. 유출량(VOLUME)의 검증결과는 ADF 검증에서 -3.410으로 5%의 유의수준에서 기각되어 단위근이 존재하지 않는 것으로 나타났고, PP 검증에서도 -3.394로 5%의 유의수준에서 기각되어 안정적인 시계열로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 안정적인 자료인 유출사고 건수(NUMBER)와 유출량(VOLUME)의 자료를 사용하여 Chow 단절점 검증을 사용하여 분석하였다.

Chow 단절점 검정 결과, Chow 단절점 검증통계량 F값이 4.4892로 5% 유의수준에서 단절점이 존재하지 않는다는 귀무가설이 기각되었다. 따라서 1980년에서 2009년까지의 기간에서 미국 유류오염법(OPA 90)이 발효된 이후인 1991년이 해양유류유출량과 해양유류유출사고의 단절점을 의미하는 것으로 분석되었다.

다음으로 이중선체 도입의 경제성을 분석하기 위하여 비용-편익분석을 실시하였다. 분석방법으로는 순현재가치법(NPV), 내부수익률(IRR), 편익비용 비율

(BCR)을 통해 실증모형을 설정하였다. 분석기간은 1999년부터 2009년까지 12년을 기준으로 하였고, 할인율은 미국 예산관리국(OMB)의 편익비용분석 할인율인 7%를 채택하였다.

경제적 편익으로는 첫 번째, 유류유출 사고 예방에 따른 유류가치, 두 번째, 유류유출 정화 및 예방조치 비용 절감 편익을 설정하였다. 마지막으로 어업 및 관광 손실비용, 환경적 및 기타 피해비용 예방편익을 설정하였다. 경제적 비용에는 이중선체 건조에 따른 추가 건조비용 및 추가 운영비용을 설정하였다.

이를 분석한 결과, 낙관적 시나리오에서 편익은 약 4억 512만 달러로 약 2억 8327만 달러인 비용에 비해 1억 2185만 달러가 많았으며, BCR은 1.43으로 나타나 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났다. 보통 시나리오에서도 BCR이 1.06으로 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났으며, 보수적 시나리오에서는 BCR이 0.89로 경제적 타당성이 없는 것으로 분석되었다.

비록 분석방법 및 분석기간, 편익 및 비용의 추정에 있어서 차이점으로 인해 결과 값의 차이가 크지만, BCR에 대해서 비교해보면 Brown Savage(1996)의 연구의 경우 낙관적 시나리오에서도 BCR이 0.46으로 편익이 비용의 절반에도 미치지 못한 것에 반해, 본 연구에서는 낙관적, 보통 시나리오에서 BCR이 각각 1.43, 1.06으로 나타나 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 이중선체 도입에 따른 경제적 타당성 분석을 위해 유류오염법(OPA 90)의 조항 중 “유조선의 이중선체 요구조건의 설립”을 대상으로 분석을 진행하였으며, 이중선체 구조 의무화에 대한 사후적 분석이므로 편익 및 비용을 추정하는데 있어서 해양유류유출사고와 관련해 실증적 분석을 실시하였다. 하지만 단일선체의 단계적 퇴출 선박 및 재화중량톤수(DWT)를 이중선체의 도입으로 가정하였으며, 대상 데이터의 부족 등으로 유조선의 내용연수인 20년이 아닌 1999년부터 2009년까지의 12년에 대해 분석하였다는 한계가 존재한다. 또한, 원시자료수집의 한계로 인해 이중선체 도입에 따른 유류유출 감소율과 유류유출에 따른 총비용 추정 모델을 타 연구의 실증자료를 활용하였다는 한계가 있다. 본 연구는 단일선체의 퇴출이 이중선체의 도입과 동일하다는 가정 하에 진행되었지만, 추후 이중선체 도입의 경제적 타당성 분석에 대한 후속적 연구가 필요하며, 보다 정교한 분석 설계를 통해 우리나라 이중선체 유조선의 경제성에 관련한 향후 연구가 이루어질 필요가 있다.

【참고문헌】

- 권오상, 2013, 환경경제학(개정판), 박영사.
- 김갑유, 1995, 미국연방해양오염방지법(OPA 1990) - 그 주요 내용과 파급 효과를 중심으로 -, 한국해법학회지, 제17권 제1호, pp.86-87.
- 김동건, 2008, 비용편익분석, 박영사.
- 김두호·임택수·나은영·김한규, 2006, 선진국과 우리나라의 유류오염 방제비용 및 피해보상제도에 관한 연구, 2006년도 해양환경안전학회 추계학술발표회.
- 김을년·하우일·최익흥, 2009, 유조선의 선체손상 시 기름의 해상유출에 대한 실험적 연구, 대한조선학회논문집 제46권 제4호.
- 김재형, 2000, 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 연구(개정판).
- 박완규, 2012, 비용-편익분석개론, 박영사.
- 봉현수, 1993, 해양오염 방지를 위한 이중선체 초대형유조선의 설계 개발, 대한조선학회논문집. 환경법연구
- 소병천, 2008, 태안 허베이 스피리트호 유류오염사고에 대한 환경법적 고찰 - 미국 유류오염법의 시사점을 중심으로 -, 한국환경법학회, 환경법연구 제30권 제2호 pp.473-505.
- 송하철·염재선·김병일, 2005, 이중선체 벌크화물선의 선체구조설계 및 경제성 검토, 한국동력기계공학회지 제9권 제2호.
- 신용승, 2011, 해양유류유출사고의 중장기적 영향분석 및 제도개선 방안, 한국환경정책평가연구원.
- 윤종희·문정환, 2008, 대형 유류오염사고 방지를 위한 단일선체 유조선 퇴출의 국제동향, 2008년도 해양환경안전학회 추계학술발표회.
- 이문숙·권석재·박세현, 2010, 유류유출시 사회경제적 영향평가 제도 연구, 해양환경안전학회 제16권 제1호.
- 임종식, 1992, IMO 이중선체규칙의 채택과 향후전망, 대한조선학회논문집.
- 조담, 2006, 금융계량분석, 청람.
- 조동오, 2007, 해양환경관리법 하위법령 제정과 공단의 효율적 운영방안 연구,

한국해양오염방제조합.

- 최재선, 2004, 국제해사기구(IMO)의 해양환경오염규제 대응방안연구, 한국해양수산개발원.
- 통계청, 2013, 『2012 한국의 사회지표』, pp.266.
- 표희동, 2012, 한·미 해양유류유출 방제체제 비교분석연구, 해양환경관리공단.
- 한국개발연구원, 2004, 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구(제4판), pp.10.
- 해양수산부, 2003-2013, 2013 해양경찰백서, 해양경찰청.
- Brown, R. S., Savage, I. 1996. The economics of double-hulled tankers. *Maritime Policy and management* 23(2), pp.167-175.
- Chow, G. C. 1960. Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. *Econometrica* 28(3), pp.591-605.
- Dikos, G., Sgouridis S. 2008. Double Hull Phase-In in the Maritime Industry: The Effects of Sunk Cost and Uncertainty. *International Journal of Ocean Systems Management* 1(1), pp.100-117.
- Dupuit, J. 1844. On the Measurement of the Utility of Public Works, *Annales des ponts et Chaussees, Memoires et Documents*, 2, 8, pp.332-375, translated by Barback, R.H. 1952, *International Economic Papers*, 2, pp.83-110.
- Etkin, D.S. 2004. Modeling oil spill response and damage costs. In: *Proceedings of 5th Biennial Freshwater Spills Symposium*, 6-8 April.
- Hanley, N., Spash, C.L. 1993. *Cost-Benefit Analysis and the Environment*. Edward Elgar Publishing Ltd, Cheltenham.
- Homan, A., Steiner, T. 2008. OPA 90's impact at reducing oil spills. *Marine Policy* 32(4), pp.711-718.
- IMO. 2007. *Formal Safety Assessment: Consolidated Text of the Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process*. MSC/Circ.1023-MEPC/Circ.392. London (MSC 83/INF.2).
- ITOPF. 2010. *The International Regime for Compensation for Oil Pollution Damage*. London, UK.

- ITOPF. 2012. Oil Tanker Spill Statistics 2012.
- ITOPF. 2012. Trends in Shipping Incidents and The Future of Arctic Shipping.
- Kontovas, C.A., Psaraftis, H.N., Ventikos N. 2010. An Empirical Analysis of IOPCF Oil Spill Cost Data. *Marine Pollution Bulletin* 60(9), pp. 1455–1466.
- McCay, D.F., Rowe, J.J., Whittier, N., Sankaranarayanan, S., Etkin, D.S. 2004. Estimation of potential impacts and natural resource damages of oil, *Journal of Hazardous Materials* 107, pp.11-25.
- National Research Council (NRC). 1991. Tanker Spills: Prevention by Design. National Academy Press, Washington, D.C.
- National Research Council (NRC). 1998. Double Hull Tanker Legislation: An Assessment of the Oil Pollution Act of 1990. National Academy Press, Washington, D.C.
- National Research Council (NRC). 2001. Environmental Performance of Tanker Designs in Collision and Grounding: Method for Comparison. National Academy Press, Washington, D.C.
- Papanikolaou, A., Eliopoulou E., Mikelis N. 2006. Impact of Hull Design on Tanker Pollution. Proceedings of the Ninth International Marine Design Conference, Ann Arbor, MI. 16–19 May.
- Psarros, G., Skjong, R., Endersen, O., Vanem, E. 2009. A perspective on the development of Environmental Risk Acceptance Criteria related to oil spills. Annex to International Maritime Organization document MEPC 59/INF.21, submitted by Norway.
- Silva, C.J. 2000. An Evaluation of the Application of Economic Analysis and Cost–Benefit Analysis Tools in the DOD Environment. Naval Postgraduate School, Monterey, CA, pp.114.
- Skjong, R., Vanem, E., Endresen, Ø. 2005. Risk Evaluation Criteria, SAFEDOR–D–4.5.2–2007–10–24–DNV–RiskEvaluationCriteria–rev–3.0. <http://www.safedor.org>.
- Talley, W.K., Jin, D., Kite–Powell, H.L. 2001. Vessel accident oil–

spillage: Post US OPA-90. Transportation Research Part D: Transport and Environment 6(6), pp.405-415.

Talley, W.K., Jin, D., Kite-Powell, H.L. 2005. Post OPA-90 vessel Oil Transfer Spill Prevention: The Effectiveness of Coast Guard Enforcement. Environmental & Resource Economics 30(1), pp.93-114.

Vanem, E., Endresen, Ø., Skjong, R. 2007a. Cost effectiveness criteria for marine oil spill preventive measures. Reliability Engineering and System Safety 93 (9), pp.1354-1368.

Vanem, E., Endresen, Ø., Skjong, R. 2007b. CATS - cost-effectiveness in designing for oil spill prevention. In: PRADS 2007 Conference, Houston, USA, October.

Yip, T.L., Talley, W.K., Jin, D. 2011. The effectiveness of double hulls in reducing vessel-accident oil spillage. Marine Pollution Bulletin 62, pp.2427-2432.

